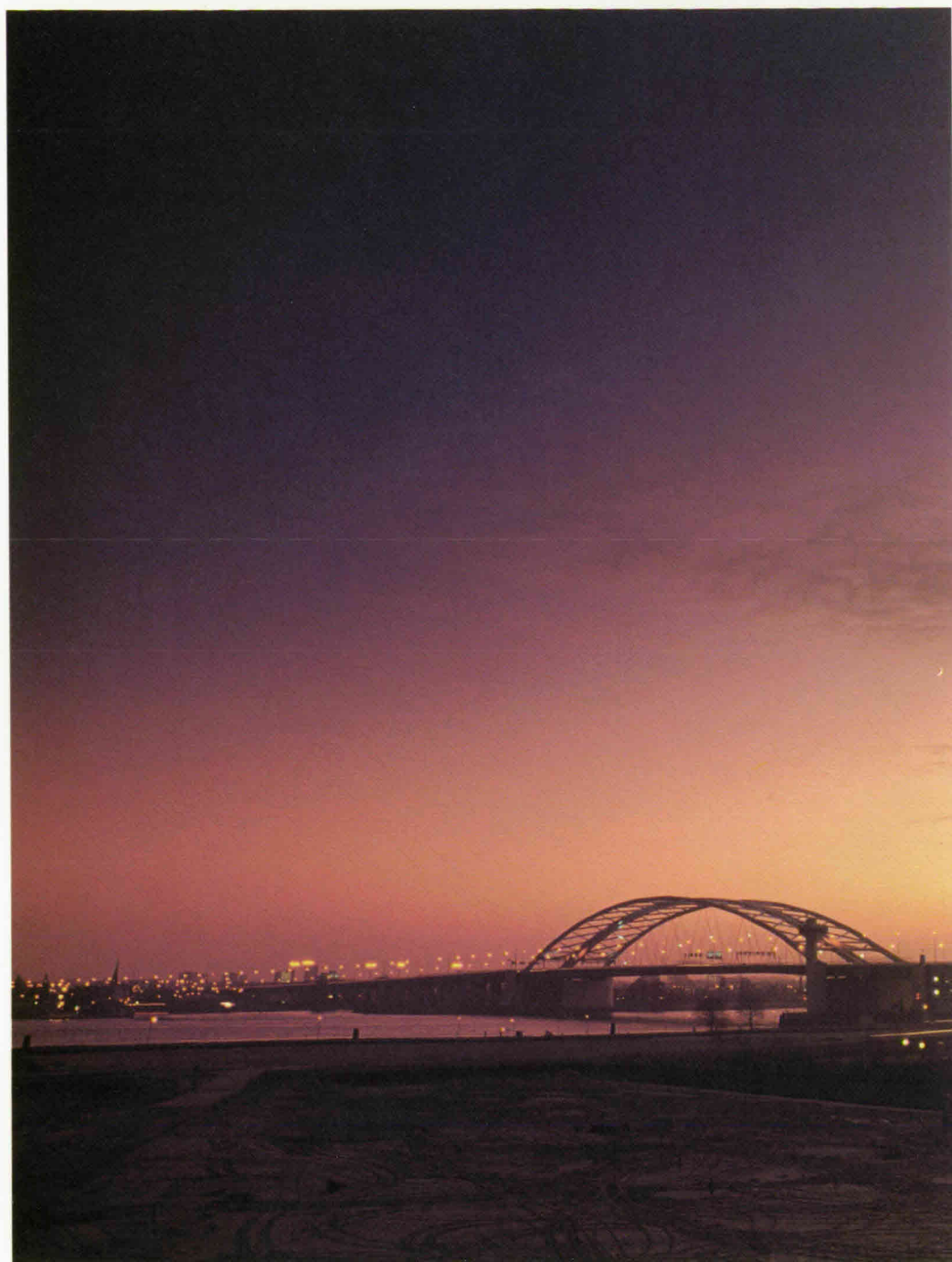


WATERTOVENAARS

Deftige ideeën voor nog 200 jaar
Rijkswaterstaat

Tegenwoordig bouwen ze ook bruggen en wegen,
al waren ze daar oorspronkelijk niet voor ingehuurd.
Aan den Boord, het Verjaagde Water



Van Brienoordbrug.



Spaarndam.





Hogebeintum, hoogste terp van Nederland.





Hondsbosse Zeewering.





Oosterschelde, Stormvloedkering.



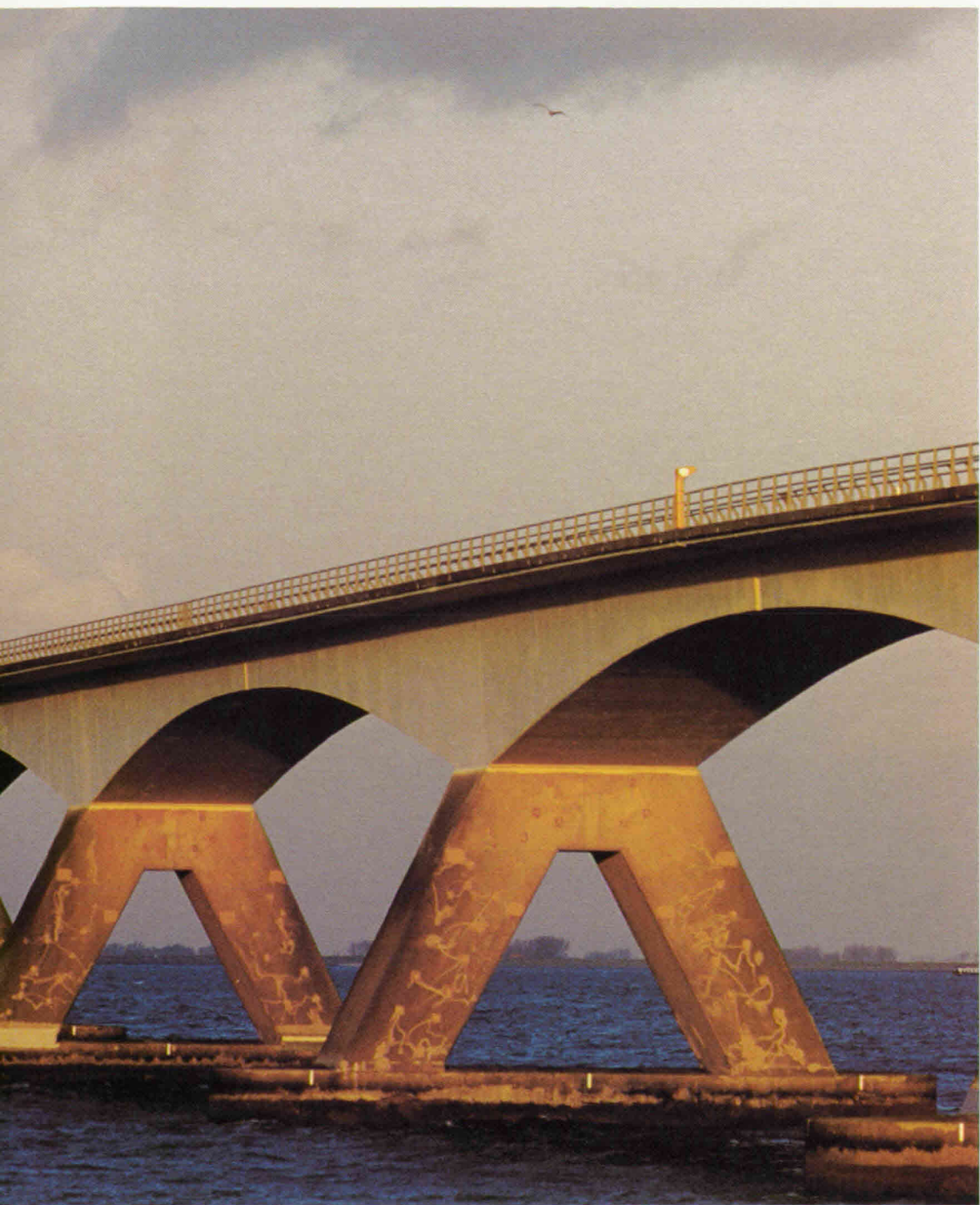


Dieren, hoog water.





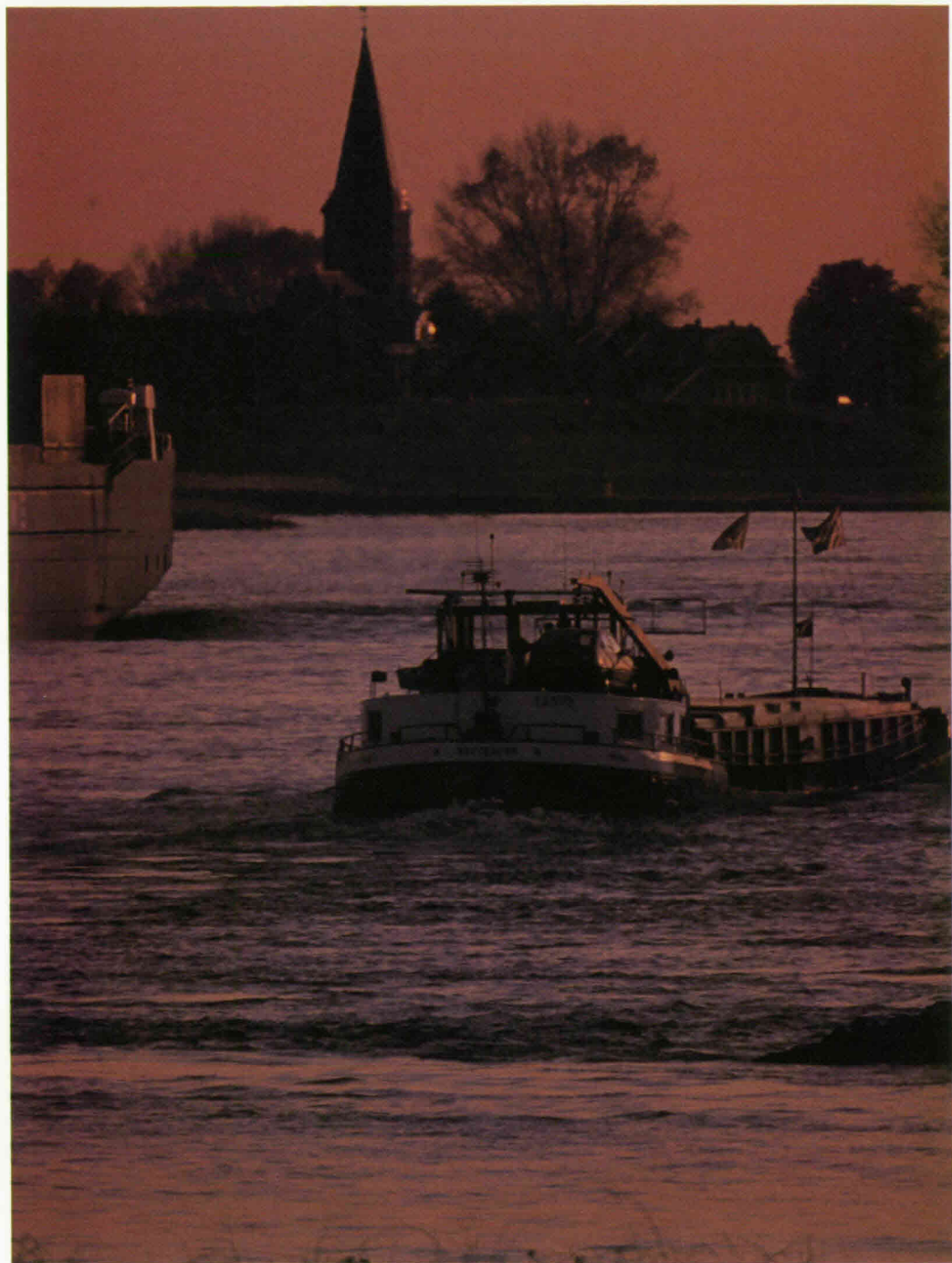
Zeelandbrug.





Maas bij Niftrik.





Langs de Waal bij Hellouw.

WATERTOVENAARS

WATERTOVENAARS

Delftse ideeën voor nog 200 jaar
Rijkswaterstaat

Onder redactie van

Kees d'Angremond
Pieter Huisman
Taeke de Jong
Gerrit Jan Schiereck
Wil Thissen

Philip Broos
Ben Herbergs

| | |
|---|-----|
| Watertovenaar of tovenaarsleerling? K. d'Angremond, P. Huisman en G.J. Schiereck | 8 |
| De oudste deltawerken: dammen en duikers uit het begin van de jaartelling T. de Ridder | 16 |
| Een erfenis uit de Bataafse periode W.M. de Jong | 24 |
| Wat eerst: wonen, water, wegen of welvaart? T.M. de Jong | 42 |
| Een nieuwe rol voor de waterstaatsingenieur F.M. Sanders | 54 |
| De terugkeer van de stedenbouwkundige discipline V.J. Meyer | 66 |
| Water P. Huisman, K. d'Angremond en G.J. Schiereck | 80 |
| Dynamische buffers in autosnelwegen D. Westland en P.H.L. Bovy | 90 |
| Op de automatische piloot door de Randstad? R. van der Heijden, V. Marchau, E. Molin en K. van Wees | 102 |
| Niet bruggen bouwen, maar zelf brug zijn B. Enserink, M.P.M. van der Ploeg, W.A.H. Thissen en G.J. de Vreede | 116 |
| Nederland als vervoersemplacement? M.P.C. Weijnen, W.A.H. Thissen en E.F. ten Heuvelhof | 130 |
| Immobilisatie van gevaarlijk afval Ch.F. Hendriks | 142 |
| Dubbel verduurzamen van wegconstructies A.A.A. Molenaar | 156 |
| Innovatie van de geometrische infrastructuur P.J.G. Teunissen | 164 |
| Radarhoogtemetingen en de (voornaam) rol van Delft M. Naeije | 178 |
| Een hoog(water)standje T. Rientjes, C. van den Akker en P. van der Veer | 190 |

| | |
|--|-----|
| Naar één beslismodel voor de veiligheid J.K. Vrijling en J. Stoop | 202 |
| De betrouwbaarheid van dijken A. Verruijt | 214 |
| Windgolven, een fascinerend fenomeen L.H. Holthuijsen en J.A. Battjes | 224 |
| Mijn droom: het railvaartuig B. Boon | 234 |
| Een waterfilm in plaats van wielen A. van Beek | 244 |
| Uren worden minuten E.A.H. Vollebregt, H. Jansen en M.R.T. Roest | 252 |
| Een kwestie van schuiven R.Brouwer, A.Hof en J. Schuurmans | 264 |
| Energie door vergisting van slib M.S.M. Jetten en M.C.M. van Loosdrecht | 274 |
| Nóg een poldermodel: hoge-sterkte beton J.C. Walraven | 286 |
| Atollen voor de Noordzeekust J. Kristinsson | 296 |
| Van maker naar regisseur H.A.J. de Ridder | 304 |

Fotokaterns

Nat & Droog | Water & Land
Jurjen Drenth

Lijst van auteurs, 313

Cover, 320

Lange tijd waren de namen van de Technische Universiteit Delft en Rijkswaterstaat vrijwel synoniemen. Beide organisaties functioneerden bijna in symbiose. Geleidelijk is daarin verandering gekomen. Die veranderingen gingen in eerste instantie uit van de universiteit die zich verbreedde en specialismen ontwikkelde die binnen Rijkswaterstaat nauwelijks aandacht kregen.

Idee en werkelijkheid waren daardoor niet langer congruent – wat eens synoniem leek werd een verengd, achterhaald beeld. Een voorstelling die eigenlijk alleen nog betrekking had op de oudste faculteit, die der Civiele Techniek. Door deze twee-eenheid hebben grote delen van Nederland overigens de vorm en functie gekregen die zij thans nog hebben.

De maatschappelijke discussie over de rol en de taak van Rijkswaterstaat is vervolgens aanleiding geweest tot grote accentverschuivingen binnen deze organisatie. De gamma-wetenschappen deden hun intrede en kregen soms zelfs de overhand. Er was geen sprake meer van het oude synoniem; de Waterstaat had behoefte aan een bredere en breder gedragen ondersteuning. Opvallend daarbij was dat de Waterstaat daarmee ook belangstelling kreeg voor de diversificatie binnen de technische wetenschappen die al veel eerder had plaats gevonden bij de TU Delft. Daarnaast speelde de behoefte aan een breder opgeleide ingenieur een rol bij de oprichting van de geheel nieuwe Delftse opleiding Technische Bestuurskunde.

Waar de betrekkingen eerst bijna uitsluitend werden onderhouden met Civiele Techniek is de laatste jaren een intensieve kennisrelatie tot stand gekomen over de volle breedte van de universiteit. Dit 'TU-brede' boek – met bijdragen van alle zeven faculteiten van onze universiteit – vormt daarvan het bewijs.

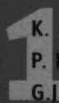
Ik hoop van harte dat de jarige Rijkswaterstaat uit dit boekwerk inspiratie kan putten voor een volgende periode van symbiose, een symbiose met al die zeven faculteiten.

DR. N. DE VOOGD,

voorzitter College van Bestuur Technische Universiteit Delft

WATERTOVENAAR **OF** TOVENAARSLEERLING?

Helpt een nieuwe trukendoos tegen
tanend vertrouwen?

 K. d'Angremond
P. Huisman
G.J. Schiereck

• • •

In 1945, toen A. den Doolaard in het boek *Het Verjaagde Water* de watertovenaar schiep, bestond er nog onbegrensd maatschappelijk vertrouwen in de tovenarij van de Waterstaat. Nu lijkt dat vertrouwen geslonken. Ligt dat aan de bevolking of aan de 'tovenaars'? Is het omdat iedereen zichzelf inmiddels tovenaar voelt, of moeten de tovenaars nog ingewikkelder trucs toepassen en een jaar naar de toneelschool? Is de tovenaar soms slechts tovenaarsleerling? Over de aanhoudende dilemma's van de watertovenaars en de symboliek van een klepduiker te Vlaardingen.

• • •

In 1945 schreef Den Doolaard het al:

'In oude tijden had je de tovenaars; en de moderne mensheid denkt dat de tijd van toveren voorgoed voorbij is. Maar net zoals in oude, onbeschaafde tijden het ene land meer regenmakers had en het andere meer sterrenwichelaars, zo hebben de landen ook vandaag nog speciale soorten tovenaars. Nederland bijvoorbeeld heeft geen regenmakers nodig; het regent er heel veel...'

En hij vervolgt:

'De Nederlanders vinden het heel gewoon om onder de waterspiegel te wonen op de bodem van de voormalige plassen en binnenzeeën, enkel van de brullende zee en de grote ruisende rivieren gescheiden door een dijk. Dat komt omdat ze onbepert vertrouwen hebben in een speciaal soort tovenaars... de watertovenaars. Van wat die watertovenaars doen, begrijpen de mensen weinig of niets. Maar dat geeft niet. De hele moderne maatschappij berust nu eenmaal op het vertrouwen van de gewone mensen in de tovenaars. En iedereen die in Nederland beneden de waterspiegel woont laat in blind vertrouwen de tovenaars-waterbouwkundigen aan de dijken ploeteren. Omdat er zoveel water in Nederland neervalt, door Nederland heenloopt en tegen Nederland opkletst, hebben de watertovenaars het druk. Ze bouwen niet alleen dijken, maar ook stuwdammen en overlaten, stoomgemalen en meerstoelen, kanalen en dukdalven. Tegenwoordig bouwen ze ook bruggen en wegen, al waren ze daar



Tekening van C.A.B. Bantzinger in Dit Is Walcheren, verschenen in 1945, Haarlem

De Zinkbaas, dirigent van het zinkstuk.

oorspronkelijk niet voor ingehuurd. Hun eigenlijke baan is en blijft watertovenaar, en ze werken niet voor particuliere bazen, maar voor de Staat.'

In alle eenvoud is dit een beschrijving die menige waterstaatsingenieur met trots en weemoed zal vervullen. De trots geldt het product van de tovenarij, de weemoed het onbegrensde maatschappelijke vertrouwen dat kennelijk in 1945 nog bestond in de tovenarij van de Waterstaat.

Waar Den Doolaard zijn schitterende boek **Het verjaagde Water** begint met een sprookjesachtige beschrijving van de schepping van ons land door de watertovenaars, weten wij inmiddels uit degelijk archeologisch werk dat de oorsprong van het sprookje misschien wel moet worden gezocht in de buurt van Vlaardingen, rond het begin van onze jaartelling. Het opzetten van een vaste woonplaats was ook toen al een probleem voor de asielzoekers van die tijd 'omdat er zoveel water in Nederland neervalt, door Nederland heenloopt en tegen Nederland opkletst'. De tovenaar van deze toenmalige asielzoekers vond de oplossing, een dijk om de nederzetting met een duiker erin om het water te laten weglopen en een terugslagklep om te voorkomen dat hoge vloed binnen kunnen dringen. Het begin van twintig eeuwen waterbeheer.

Het lijkt een succesverhaal, maar was de tovenaar eigenlijk wel een volleerde tovenaar of had hij meer van de tovenaarsleerling die Goethe beschrijft in zijn gedicht 'Der Zauberlehrling'? Ook in dat gedicht speelt water een belangrijke rol. De bezem die door de leerling behekt was om water te halen, ging daarmee door tot er echt sprake was van een watersnood. De meestertovenaar moest er vervolgens aan te pas komen om de zaak weer in het reine te brengen.

Stel dat de tovenaar van Vlaardingen ook een leerling was, dan heeft hij misschien ook



Tekening van C.A.B. Bantzinger in Dit Is Walcheren, verschenen in 1945, Haarlem

'Dit was eens een weg door de vruchtbare akkers.'
Tekening van C.A.B. Bantzinger in Dit Is Walcheren, verschenen in 1945 te Haarlem bij Tjeenk Willink, een uitgave "onder auspiciën van het Departement van Openbare Werken en Wederopbouw en van het Nationaal Instituut / Centrale Organisatie tot verdieping van het nationaal bewustzijn en tot versterking van de nationale saamhorigheid." De illustraties van Bantzinger vormden met artikelen van Jef Last, A. den Doollaard en Ed. Hoornik een net na de oorlog uitgegeven bundel, waarvan volgens de omslag "het batig saldo ten goede komt aan het herstel van Walcheren".

een proces gestart dat niet meer te stoppen was, en lijkt de geschiedenis meer aan de kant van Goethe dan van Den Doolaard te staan. Want heeft de verbeterde ontwatering niet gezorgd voor klink van de bodem, zodat de duiker moest worden vervangen door een windmolen en de windmolen door een stoomgemaal? Is er nog wel een meestertovenaar die de ontsnapte geesten terugkrijgt in de fles?

Dat klinkt rampzalig, maar was er een alternatief, en waartoe zou dat hebben geleid? Stelt u zich voor dat er 2.000 jaar geleden al een MER-commissie in Vlaardingen had bestaan. Zou die commissie onze watertovenaar hebben gestopt en hebben geadviseerd de nuloptie te kiezen en niet in dit gebied te gaan wonen? Zou er dan vandaag nog sprake zijn geweest van het Koninkrijk der Nederlanden? En welk oordeel zouden latere generaties hebben over een dergelijk besluit zonder dat zij het vervolg van de geschiedenis kennen met de huidige welvaart, met de cultuuruitingen van de Renaissance, de Gouden Eeuw, De Stijl en COBRA?

KORTE OPSOMMING Het verhaal van de waterhuishouding met de Vlaardingse klepduiker staat natuurlijk niet op zichzelf. Er zijn talloze vindingen en ontwikkelingen uit het verleden waarvan in de aanvang niet duidelijk was waartoe zij zouden leiden, niet bij realisatie noch bij niet-realisatie. De eerlijkheid gebiedt te zeggen dat wij in veel gevallen ook nu nog moeite zouden hebben met het opnieuw nemen van een dergelijke beslissing, hoewel men nu ten minste een deel van de gevolgen kent. Hierbij een korte opsomming van wel en niet gerealiseerde plannen met omstreden gevolgen.

De grote rivieren: Aan de Rijn is al twintig eeuwen gesleuteld om er minder last en meer gemak van te hebben. Maatregelen om de scheepvaart te bevorderen en om overstromingen tegen te gaan, werden met wisselend succes uitgevoerd. In de vorige eeuw werd de Oberrhein flink aangepakt. Het steeds veranderende stelsel van geulen en moerassen, waardoor er ook veel tyfus en malaria heerste, werd gereguleerd. Deze grootschalige en systematische aanpak had gevolgen in het hele stroomgebied en leidde er uiteindelijk toe dat de hele rivier van Basel tot de zee op de schop is genomen is.

Het geheel is een haasje-over van werken ter verbetering voor de scheepvaart, de waterafvoer of de elektriciteitsproductie en het compenseren van, deels onverwachte, gevolgen. Het voorlopige eindresultaat is een rivier die in een keurslijf zit, waarvan de veters elke keer, zagezegd, moeten worden bijgesteld. Nu wordt weer gesproken over iets meer adem voor de rivier door die veters weer iets lossen te maken en de rivier wat meer ruimte te geven.

De mobiliteit: De auto is voor velen een mooie toepassing van de bezem van de tovenaarsleerling. Na veel gesjouw was het eindelijk mogelijk om een apparaat al het loopwerk te laten doen. Uiteraard wilde iedereen dat wel en we weten waartoe dat heeft geleid en er is ook een idee waartoe dat nog gaat leiden. Er is nu een mooi rijkswegennet, maar over elke kilometer erbij ontstaan wel steeds meer problemen. Het werd dus op een gegeven moment ook duidelijk dat je daarmee niet maar door kunt gaan en dat naar alternatieven moet worden gezocht.

Dat blijkt lastig. Toen minister Bakker in 1970 in zijn ToekomstPlan 2000 een schets gaf van de groei van het autopark, leverde dat veel kritiek omdat er onvoldoende visie werd gegeven hoe dat bijgebogen kon worden. De uiteindelijk realisering van die groei blijkt maar weinig af te wijken van de prognose van destijds, ondanks alle plannen om mensen te bewegen andere wegen te bewandelen. Het alternatief is ook niet eenvoudig.

Men kan nu eenmaal niet de auto verbannen uit Nederland of zo duur maken dat alleen een **happy few** er gebruik van kan maken.

Het openbaar vervoer: In de vorige eeuw werd de komst van de spoorweg met argusogen gadeslagen. Rampen werden voorspeld voor de landbouwers die het stalen monster over hun grond lieten passeren. Nog is bekend hoe ook toen gepoogd werd de aanleg te frustreren door te weigeren grond te verkopen voor de aanleg van de lijn tussen Amsterdam en Haarlem. Direct na de Tweede Wereldoorlog bleek een deel van het uitgebreide net in de huidige randstad onrendabel, en men besloot de lijnen op te heffen. Het tracé werd snel overgenomen voor de aanleg van wegen. Nog steeds ziet men de stationsgebouwtjes langs autowegen liggen in dorpjes als Aalsmeer, Nieuwveen, Uithoorn en Aarlanderveen. Nog geen vijftig jaar later is er weer sprake van een **light rail**-systeem in de Randstad.

Het Deltagebied: Het Deltaplan werd in de jaren vijftig gezien als de definitieve oplossing van veel problemen. Het plan zelf is al een uitkomst van vele eeuwen ingrepen in een gebied, waardoor het steeds bewoonbaarder, maar ook kwetsbaarder werd. Het voorlopige eindresultaat, met bijstellingen als de stormvloedkering in de Oosterschelde, mag er nog steeds zijn, maar ook nu weer zijn we bezig met aanpassingen aan het plan.

De bodem van het Hollands Diep blijkt ernstig vervuild. De aanslibbing als zodanig heeft niemand verrast, maar de vervuiling van het slib werd in de jaren vijftig niet gezien. Ook beginnen de harde grenzen tussen zout en zoet, die nadrukkelijk werden nagestreefd in het Deltaplan, nuanceringen op te roepen. Er wordt serieus gesproken over het weer toelaten van zout water in het Haringvliet en zeer recentelijk over meer zoet water in de Oosterschelde.

Het systeem In al deze voorbeelden zit een systeem. De mens richt zijn omgeving in om met meer en beter te kunnen leven en dat doorgaans op zeer goede gronden. Vervolgens blijken er onverwachte nadelen of veranderen de wensen. Kennelijk is de samenleving veroordeeld, als we ons er eenmaal mee gaan bemoeien, dat tot in



Bron: Dr. Dijkbessen op Walcheren. Dienst Droogmaking Walcheren, Rijkswaterstaat

De Nolledijk.



Bron: De Dijkbressen op Walcheren. Dienst Droogmaking Walcheren, Rijkswaterstaat

Het zinkstuk.

lengte van jaren te blijven doen. Hier blijkt vaak een scheiding der geesten tussen homo faber en non-interventionisten. De Technische Universiteit Delft en Rijkswaterstaat staan, bijna per definitie, aan de eerste kant vanuit een positivistische gedachte.

Er is vaak veel trots te bespeuren op het grootse dat werd verricht. Daaraan hoort tegenwoordig duidelijk bescheidenheid te worden toegevoegd, in het besef dat het altijd net weer iets anders uitpakt dan we gedacht hadden. Het blijft dus doormodderen in deze delta. Toch zijn we, met een mix van trots en bescheidenheid, ervan overtuigd dat het alternatief nog steeds minder aantrekkelijk is.

Opvallend bij deze voorbeelden uit de civieltechnische sector is de omvang van de beslissing, de onomkeerbaarheid en zeker op dit moment de intensieve participatie van de bevolking in de discussie. Andere sectoren van de techniek kennen vergelijkbare dilemma's, maar slechts een enkele keer leidt dit tot grote publieke aandacht. (Vergelijk de geringe publieke aandacht voor de omstreden keuze door architecten voor de kantoorruimte, of de planologische opzet van de Bijlmer of welke nieuwbouwwijk dan ook.)

Al met al moet worden geconstateerd dat het vertrouwen van de bevolking in de waterlovenaars toch niet meer zo groot is als Den Doolaard in 1945 veronderstelde. Ligt dat aan de bevolking of aan de tovenaars? Het lijkt erop dat de tovenaars niet minder knap zijn geworden, in ieder geval zijn de kunststukjes (of kunstwerkjes) nog heel spectaculair: de Deltawerken, met de stormvloedkeringen in Oosterschelde en Waterweg, kunnen zich verheugen in een positieve publieke belangstelling.

Wantrouwt het publiek de tovenaars in de veronderstelling dat hij slechts tovenaarsleerling is? Of heeft dit tijdperk met zijn doe-het-zelfcultuur echt de geest uit de fles gehaald en voelt ieder zich tovenaars? In dat laatste geval moet de samenleving echt oppassen, want dan zouden we toch met een groot aantal leerlingtovenaars opgescheept kunnen zitten.

Hoe moeten de tovenaars reageren op dit verminderd vertrouwen? Moet de tovenaars-

broederschap die haar leden verbood om de trucs aan het publiek te verklappen, haar regels versoepelen of juist strenger maken? Moet de tovenaarsopleiding worden aangepast voor het aanleren van nog ingewikkelder trucs of moeten de leerling-tovenaars nog een jaar naar de toneelschool om hun presentatie professioneel te maken?

Een volledig bevredigend antwoord is niet te geven. Toch lijkt de ervaring te leren dat de voortgang van de techniek niet is te stoppen, maar ook dat veel van de nieuwe ontwikkelingen hebben bijgedragen aan het scheppen van meer en nieuwe mogelijkheden voor de ontplooiing van individuen en van de samenleving.

TENSLOTTE Samengevat: er is noch voor de jarige Rijkswaterstaat noch voor de TU Delft aanleiding om bij de pakken te gaan neerzitten. De klepduiker uit Vlaardingen symboliseert het belang om met inzicht en vakmanschap te voorkomen dat wij een speelbal worden van de krachten van de natuur. Dat laatste draagt zeker niet bij tot een harmonieuze en duurzame ontwikkeling van onze samenleving. Daarom hebben de twee 'natte' vakgroepen van de subfaculteit Civiele Techniek - Waterbouw en Watermanagement - dan ook besloten de restauratie van de Vlaardingse klepduiker te financieren. Zo kan die tot in lengte van dagen ook door Rijkswaterstaat worden benut om het belang van de waterstaatsmissie duidelijk te maken aan een breed publiek.

DE OUDSTE DELTAWERKEN:
DAMMEN EN DUIKERS UIT
HET **BEGIN** VAN DE
JAARTELLING

**Nederlandse boeren waren de vroegste
waterstaatkundige ingenieurs**

2 I. de Ridder

• • •

Nederland heeft met waterstaatkundige werken een naam hoog te houden. De kennis van de waterstaatkunde kent een zeer lange traditie: al rond het begin van de jaartelling werden er in het Maasmondgebied door de plaatselijke boeren dammen en sluzen aangelegd. Dat bewijst een opwindende, recente vondst in Vlaardingen. Op amper vijftien kilometer afstand van het sluitstuk van de Deltawerken werd een heel stelsel van prehistorische dammen ontdekt, waarvan één met klepduiker. De klepduiker is uniek; hij vormt het oudste sluiswerk van West-Europa en is daarom inmiddels geconserveerd. De duiker is aangetroffen in een gebied dat destijds door de Romeinen werd bezet. Omdat er verder geen duikers bekend zijn uit het West-Romeinse rijk mogen boeren in het Maasmondgebied zich de allereerste waterstaatkundige ingenieurs van West-Europa noemen. Een unieke ontdekking te Vlaardingen: de vondst van niet alleen het meest uitgebreide stelsel van waterstaatkundige werken, maar ook het oudste. Een bericht over de vroegste deltawerken.

• • •

VAN TERP NAAR DAM Nederland is een nat land. Rivieren, de zee, hoge grondwaterstanden en regenval teisterden al duizenden jaren de bewoners van de lage landen. Met name langs de kust, waar rivieren, kreken en zee elkaar ontmoeten, hield men lang niet altijd droge voeten. De West-Friese bronstijdboeren trachtten ruim 2900 jaar geleden hun erf droog te houden door greppels te graven, die de woonerven moesten ontwateren, of door hun erven op te hogen. Daarmee was het concept terp geboren. Het middel was wel probaat, maar weinig efficiënt. Er moest immers aardig wat grond worden verzet om een klein stukje erf droog te krijgen. Eeuwenlang bleef

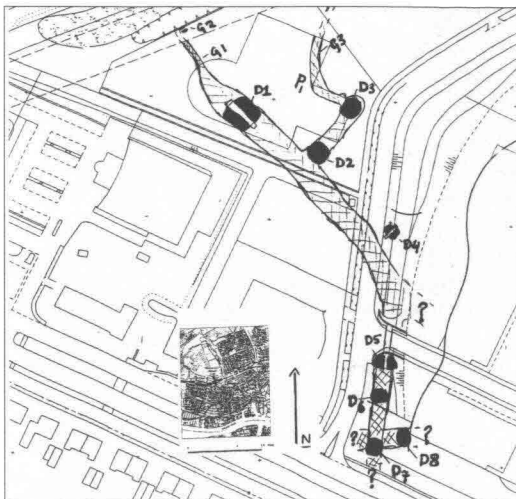


© Gem. Vlaardingen

Deel van een klepduiker uit 100 na Chr. wordt blootgelegd door medewerkers van gemeente Vlaardingen.

het graven van greppels en het ophogen van de leefomgeving het enige middel tegen wateroverlast. Tot vlak voor de jaartelling. In het Maasmondgebied ontdekte men dat wateroverlast heel eenvoudig was aan te pakken. Leg een dam aan in de kreek en je bent van een hoop gedoe af. Misschien vond de ontdekking wel in Vlaardingen plaats want daar werd in 1996 in een kreek uit de Late IJzertijd een aantal balken aangetroffen, beschoeid met palen. Tussen de balken was grond geworpen, zodat het geheel een waterkerende functie kreeg. De C14-dateringen van een tweetal palen kwamen uit op circa 175 voor Chr. De dam was daarmee niet alleen de oudste bekende damconstructie van Nederland, maar tevens van West-Europa.

DUIKERS EN SLUIZEN Een dam heeft als vervelende eigenschap dat die ook het water tegenhoudt waar men juist vanaf wil. Na een hevige regenbui stroomt een kreek al snel vol. Als het water dan niet snel wordt afgevoerd, krijg je alsnog natte voeten. Maar ook daar werd in het Maasmondgebied een doeltreffende oplossing voor gevonden: in de dam werd een uitgeholde boomstam aangelegd, zodat de kreek in het achterland kon worden ontwaterd. Het water uit de kreek kon worden afgevoerd, maar bij hoogwater stroomde het door de duiker weer terug. Dit was natuurlijk niet de bedoeling. Ook daar vond men een bijzonder elegante oplossing voor. Door aan de kant waar het hoogwater vandaan komt, zogezegd de zeezijde, een klepje te bevestigen dat als een soort ventiel functioneerde. Bij hoogwater werd het klepje tegen de duiker gedrukt,



Situering van het oude dammenstelsel geprojecteerd over het moderne Vlaardingen.

waardoor er geen water meer het achterland in kon stromen. Bij laagwater kon het overtollige regenwater uit het achterland door de duiker stromen, waardoor het klepje vanzelf werd opgedrukt. De duikers zonder klepje werden vooral gebruikt voor de ontwatering van greppels.

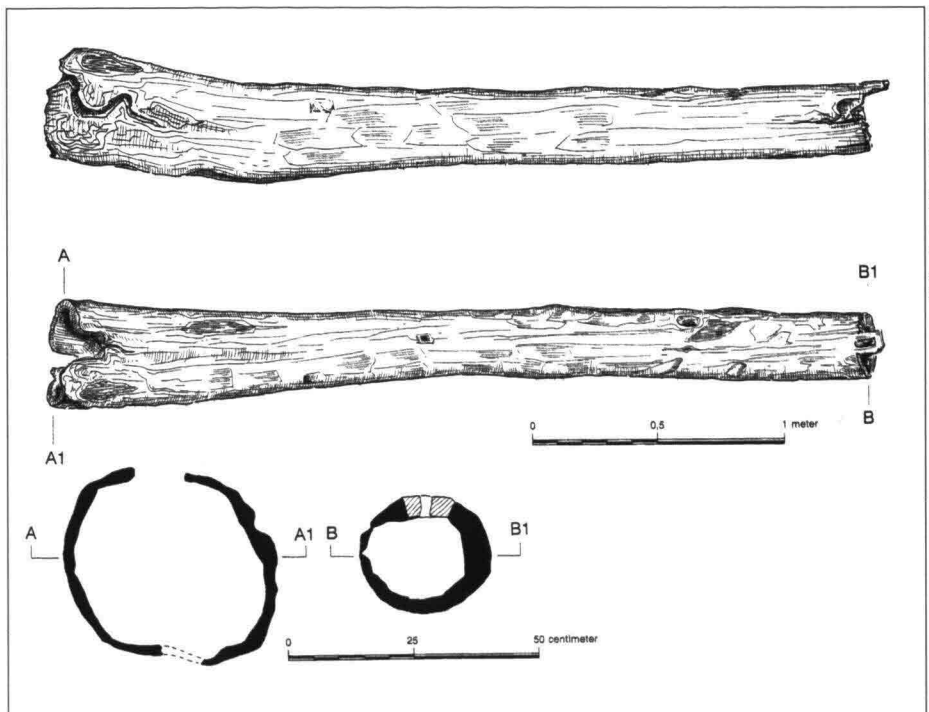
VLAARDINGEN Een prachtig voorbeeld van een klepduiker is onlangs in Vlaardingen opgegraven. Op het bedrijventerrein Hoogstad zijn door het VLAK (Vlaardings Archeologisch Kantoor, gemeente Vlaardingen) in de periode van 1993-1997 in totaal maar liefst acht dammen aangetroffen, waarvan drie met een duiker en een met klepduiker. Over meer dan 200 meter kon een kreek worden blootgelegd, waarin zes dammen en twee duikers waren aangelegd. In het noordelijk deel van de kreek, werd een bijzonder grote dam (dam 1) aangetroffen. Die was ten minste 9 m lang en 6,30 m breed.

Middenin de dam lag een duiker die was opgebouwd uit twee uitgeholde boomstammen. Duikerhelft 1 is een uitgeholde els van 3.60 m lang. De els is waarschijnlijk met behulp van een lepelboor uitgeboord. Dit geldt tevens voor duikerhelft 2, een uitgeholde es van 3.15 m lang. Deze was aan de voorzijde taps gedisseld, zodat deze in de achterzijde van de duikerhelft 1 kon worden geschoven. Om te voorkomen dat de duikerhelften ten opzichte van elkaar zouden gaan draaien, was er in duikerhelft 2 een stopje aangebracht die paste in een U-vormige uitholling van duikerhelft 1.

De overlapping van de in elkaar geschoven duikers zal circa 45 cm hebben bedragen, waardoor een totale lengte van 6.30 m werd bereikt, tevens de minimale breedte van de dam. Aan de mond van duikerhelft 1 (de zeezijde) bevond zich een rechthoekige uitsparing. Hierin was ooit een houten klepje bevestigd, dat bij hoogwater werd dicht gedrukt, waardoor werd voorkomen dat het water het 'achterland' in zou stromen. Om de dam tegen het stromende water te beschermen, was hij aan beide zijden dicht beschoeid met palen, soms zelfs bijna twee rijen dik. In totaal waren meer dan 150 palen gebruikt, waarvan naar schatting zeker 95% uit els bestond.

Om onderspoeling van het damlichaam te voorkomen, lag voor de dam een 10 tot 20 cm dik pakket van meer dan 14.000 scherven. De scherven, voor ongeveer 11% afkom-

Als de Romeinen de uitvinders van de duiker waren, waarom wordt die dan niet elders aangetroffen?



Zij-, bovenaanzicht en doorsneden van de eerste duikerhelft.

stig van geïmporteerd vaatwerk, kunnen worden gedateerd in de periode 75 tot 100 na Chr. De in elkaar geschoven constructie met een stopje dat als borg moest dienen, was echter niet zo succesvol. De duikerhelften zijn namelijk bij de opgraving in diagonale toestand aangetroffen. De duikerconstructie is als het ware in het midden naar beneden geknikt. Dit wijst erop dat het damlichaam van binnenuit is uitgespoeld, iets dat vermoedelijk werd veroorzaakt door een slechte verbinding van de beide duikerhelften. Wellicht mag dit worden gezien als een aanwijzing dat de inheemse boeren nog aan het begin stonden van een nieuwe ontwikkeling op waterstaatkundig gebied, en is de constructiefout te omschrijven als een 'kinderziekte'.

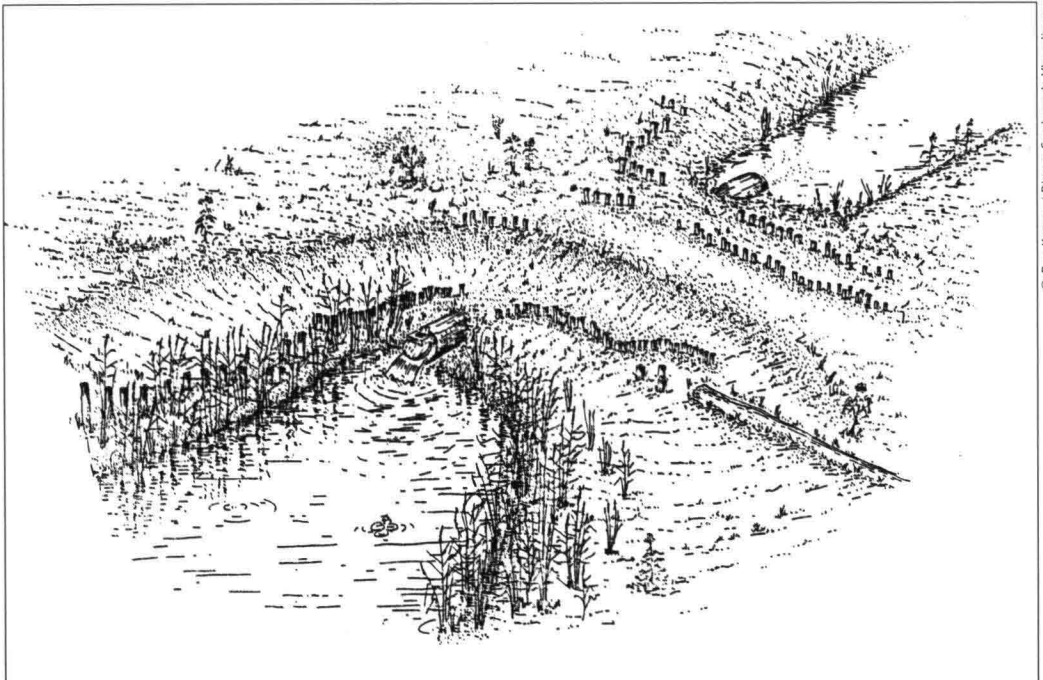
Aangezien deze klepduiker tot het oudste sluiswerk van West-Europa behoort, en juist voor Nederland een grote symbolische betekenis heeft, was het van belang dat deze duiker geconserveerd zou gaan worden. Met bijdragen van Rijkswaterstaat, de TU Delft en Mondriaan Stichting is het de Stichting Archeologie en Bouwhistorie Vlaardingen gelukt om geld bijeen te krijgen om dit oudste en unieke waterstaatkundige werk te behouden. Thans staat het tentoongesteld in Museum Hoogstad te Vlaardingen.

OPSCHUIVENDE SYSTEEM Op grond van de stratigrafische ligging en de dateringen van het import-aardewerk zijn er aanwijzingen dat de oudste dam in het noordwesten is gelegen (dam 1) en de jongste in het zuidoosten (dam 7). Het lijkt er zodoende op dat de dammen in zuidoostelijke richting, naar de Maas, in tijd opgeschoven. Dit is ook niet zo'n vreemde veronderstelling, want zodra er een dam vóór de andere wordt aangelegd verliest de eerste dam zijn functie - tenzij de tweede dam was geconstrueerd om te fungeren als stuw.

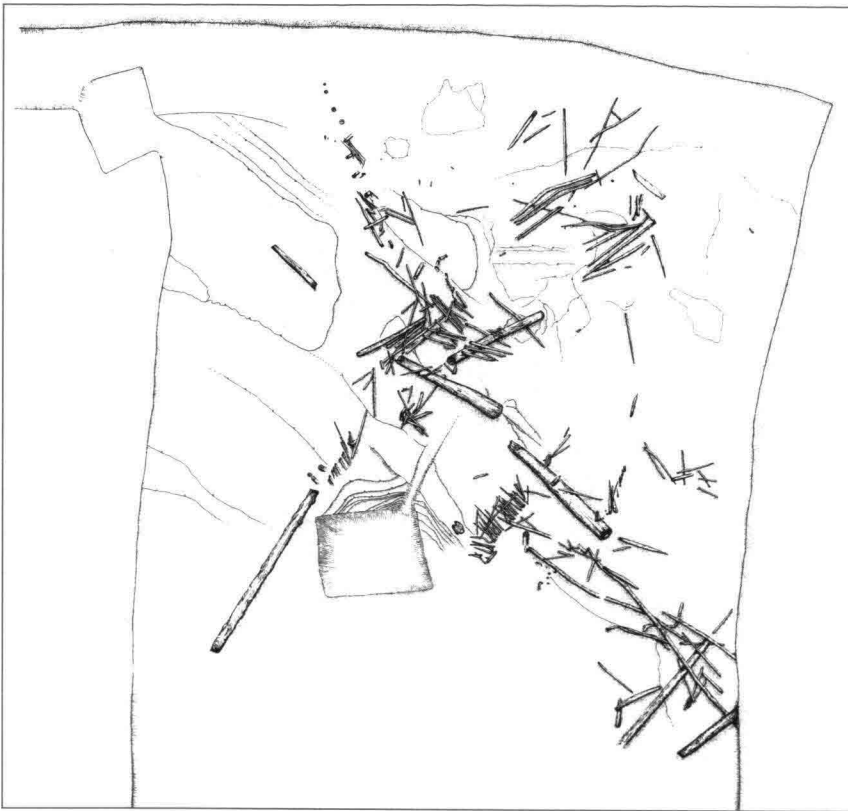
DE DAMMEN De dammen zijn alle opgebouwd uit klei- en zandzoden, die worden afgewisseld door vlijlagen van plantaardig materiaal met soms een dikte van enkele centimeters tot ruim een decimeter. Archeobotanisch onderzoek heeft aangetoond dat de planten uit de vlijlaag van dam 1 in het najaar werden verzameld, wellicht werd in dat seizoen ook de dam aangelegd. Deze lagen droegen waarschijnlijk bij tot een betere stabiliteit van het damlichaam. De lagen waren namelijk bolvormig aangebracht, waardoor kreek- en regenwater steeds naar de periferie van de dam werden afgevoerd. Hierdoor werd verweking van het damlichaam, en daarmee verzwakking, voorkomen. De hechte plantenstengels zorgden tevens voor een stevige structuur. Menig damdoorbraak is juist afgebroken op de vlijlaag. Het damlichaam was aan de kreekzijden beschoeid met palen. Als de dam een duiker bevatte en dus te lijden had van stromend water, was er sprake van een zeer dichte paalzetting, soms wel twee rijen dik, waardoor het water geen vat kon hebben op het damlichaam. Om onderspoeling te voorkomen, had men op de kreekbodem een bed van scherven aangelegd of een laag van takken en stammen aangebracht.

CONSTRUCTIE VAN DE DUIKERS Tot op heden zijn er uit Nederland dertien duikers uit de eerste eeuwen van onze jaartelling bekend. Opvallend is dat er een grote variëteit in constructies bestaat. Grofweg kunnen de duikers in de volgende typen worden onderverdeeld:

- type 1: ongekliefde, uitgeboorde boomstammen;
- type 2: eerst gekliefde en daarna uitgeholde boomstammen;
- type 3: duikers die bestaan uit een gecombineerde aanpak: gekliefd en ongekliefd; en
- type 4: duikers die vervaardigd zijn uit een gekliefde boomstam en een plank.



Reconstructietekening van dam met klepduiker.



Bovenaanzicht van de dam met in het midden de klepduiker.

DE OUDSTE DUIKERS De oudste damconstructie dateert uit het jaar 175 voor Chr. Wanneer de eerste duikers zijn aangelegd, valt nog niet met zekerheid te zeggen. Het is niet onmogelijk dat ze al van voor onze jaartelling dateren, maar zeker is dat niet. Wel staat in ieder geval vast dat het gebruik van duikers bekend is in de periode 75-100 na Chr. In de loop van de derde eeuw, als de bewoningsdichtheid drastisch afneemt, lijken ook de duikers weer te verdwijnen. Tenminste zeven eeuwen later wordt de volgende generatie duikers aangelegd. Hoewel er belangrijke overeenkomsten in de constructie zijn, zijn er vooralsnog geen aanwijzingen dat er sprake is van continuïteit in ontwikkeling.

TENSLOTTE: EEN INHEEMSE VINDING Het lijkt voor de hand te liggen om de innovatie van duikers toe te schrijven aan de Romeinen die hier rond 12 voor Chr. het zuidelijk deel van Nederland bezetten. Het verspreidingsgebied behoort immers tot het door de Romeinen bezette deel. Opvallend is echter dat 11 van de 13 duikers in een inheemse context zijn aangetroffen. Dit wil zeggen dat ze zijn aangetroffen in een inheemse nederzetting waar geen Romeinen woonden en waarschijnlijk zelfs ook nooit kwamen. Opmerkelijk is bovendien dat er verder geen duikers uit het West-Romeinse rijk bekend zijn. Als de Romeinen de uitvinders ervan waren, waarom worden ze dan niet elders aangetroffen?

Het lijkt dan ook niet te gewaagd om te stellen dat boeren in het Maasmondgebied de vroegste waterstaatkundige ingenieurs van West-Europa waren.

REFERENTIES

- Arends, G.J., 1994: Sluizen en stuwen. *Bouwtechniek in Nederland* 5, Delft.
- Boekhoven, J., 1895: Verslag van het verhandelde in de Algemeene Vergadering van het Provinciaal Utrechtsch Genootschap van Kunsten en Wetenschappen, gehouden den 25 Juni 1895. Verslag van de opgravingen van Romeinsche Oudheden te Vechten (...) in de jaren 1892-1894, Utrecht.
- Brinkkemper, O., 1996: Het milieu rond een duiker uit de Romeinse Tijd. Archeobotanisch onderzoek aan monsters van de vindplaats Vlaardingen-Hoogstad, BIAAal 26.
- Brugge, J.P. ter, 1995: Vlaardingen: Hoogstad. In: *Holland*, jaargang 27, nr.6, p. 383-386.
- Brugge, J.P. ter, 1996A: Vlaardingen: Hoogstad. In: *Holland*, jaargang 28, nr.28, p. 361.
- Brugge, J.P. ter, en T. de Ridder, 1996: Dammen en duikers rond het begin van de jaartelling, in: Programmaboekje Reuvensdagen 1996, p. 18.
- Bult, E.P., 1983: Midden-Delfland, een archeologische kartering, inventarisatie, waardering en bewoningsgeschiedenis, in: *Nederlandse Archeologische Rapporten* 2, uitgave ROB.
- Bult, E.J. en D.P. Hallewas, 1990: Graven bij Valkenburg III, het archeologisch onderzoek in 1987 en 1988, Delft, p. 1-36.
- Byvanck, A.W., 1943: *Nederland in den Romeinschen tijd*, II.
- Carmiggelt, A., E.J. van Ginkel, 1993: De archeologie van IJsselmonde. Vondsten tussen Poortugaal en Zwijndrecht.
- Döbken, A.B., 1989: Spijkenisse: Hartel West, in: *Archeologische kroniek Zuid-Holland*, Holland, jaargang 21, p. 329.
- Hallewas, D.P., 1988: Valkenburg, in: *Archeologische kroniek van Holland over 1987, II Zuid-Holland*, Holland, jaargang 20, 1988, p. 318-322.
- Hallewas, D.P., R.M. van Dierendonck en K.E. Waugh, 1993: The Valkenburg excavations 1985-1988. Introduction and Detail Studies, in: *Nederlandse Oudheden* 15, Amersfoort, p. 11-46.
- Hoek, C., 1971: Oudheidkundig Bodemonderzoek te Rotterdam en omgeving in 1970, in: *Rotterdams Jaarboekje* 1971, p. 131-143.
- Hoek, C., 1979: 10.000 jaar wonen in het Maasmondgebied. 's-Gravenhage.
- Londen, H. van, 1996: Schiedam-Kethel: West Abtspolder. In: *Holland*, jaargang 1996, p. 355-358.
- Rappol, M. en C.M. Soonius, 1994: In de bodem van Noord-Holland. *Geologie en archeologie*, Amsterdam.
- Ridder, T. de, 1997A: 'Wat gek, een heel potje in een holle boom'. In: *Musis*, jaargang 3, nr. 6, p. 180-183.
- Ridder, T. de, 1997B: Inheems-Romeinse deltawerken op bedrijventerrein Hoogstad, in: *Terra Nigra* 140, p. 28-48.
- Ridder, T. de, 1997C: Een inheems-Romeinse dam te Holy? De tiende dam in Vlaardingen, in: *Terra Nigra* 141, p. 25-30.
- Rijn, P. van, in: Dierendonck, R.M. van, D.P. Hallewas, K.E. Waugh, 1993: The Valkenburg excavations 1985-1988. Introduction and Detail Studies, in: *Nederlandse Oudheden* 15, Amersfoort, p.146-216.
- Rijn, P. van, april 1997: Archeologisch onderzoek in Midden-Delfland, nieuwsbrief 6, april 1997.
- Roo, Chr. de, en A. Brouwer, 1972: Een zijl of een duiker in de Westabtspolder te Schiedam, in: *Westerheem* 21, p. 209-216.
- Trierum, M.C. van, 1986: Landschap en bewoning rond de Bernisse in de IJzertijd en de Romeinse tijd, in M.C. van Trierum en H.E. Henkes (red.), *Landschap en bewoning rond de mondingen van Rijn, Maas en Schelde*, Rotterdam (Rotterdam papers V), p. 49-75.
- Trierum, M.C. van, A. Döbken en Guiran, 1988: Boorbalans 1. Bijdragen aan de bewoningsgeschiedenis van het Maasmondgebied, Rotterdam.

EEN **ERFENIS** UIT

DE BATAAFSE PERIODE

De Franse wortels van Rijkswaterstaat

3 W.M. de Jong



Toen Rijkswaterstaat op 24 mei 1798 werd opgericht als 'Bureau voor den Waterstaat', heerste Frankrijk over Nederland. Achteraf gezien was 1798 een critical juncture, een cruciaal kruispunt van wegen. De geboorte van Rijkswaterstaat in die periode verfransde zijn organisatievorm en huidig opereren. Twee eeuwen later lijkt Rijkswaterstaat weer op zo'n juncture aangeland. De technische deskundigheid van Rijkswaterstaat volstaat niet meer. Burgerinvloed, maatschappelijke discussie en de omgang met lagere overheden dwingen tot een heroriëntatie, tot institutionele hervorming. In dit hoofdstuk wordt nagegaan hoe de huidige praktijk van infrastructuurplanning in Nederland en Frankrijk verloopt en worden drie modellen voor modernisering aangeboden. Nederland zal het alleen nu zelf moeten doen. Er is geen buitenlandse overheerser meer.



Rijkswaterstaat bestaat tweehonderd jaar. Dat betekent dat de ontstaansgeschiedenis ervan teruggaat tot de Bataafse Republiek (1795 - 1806), waarin Nederland een schatplichtige vazalstaat van Frankrijk was. Het beleid onder de gedemocratiseerde Staten-Generaal en vooral later onder raadpensionaris Schimmelpenninck boette in deze periode steeds meer aan onafhankelijkheid in. De Bataafse Republiek ging vooraf aan de onderwerping van de Noordelijke Nederlanden aan het koningschap van Lodewijk Napoleon (1806 - 1810), de broer van de keizer, en uiteindelijk zelfs de kortstondige inlijving bij het Franse keizerrijk zelf (1810 - 1813).

Eerst een rijtje relevante jaartallen, gebaseerd op Schama (1977), Driessen (1994) en Toussaint (1997):

1795 - 1806:

Na een militaire nederlaag tegen de Fransen komen de Noordelijke Nederlanden onder het bewind van een door hervormers gedomineerde Staten-Generaal en later van de

door Parijs benoemde raadpensionaris Schimmelpenninck. Gedurende deze periode worden ze steeds minder zelfstandig van Frankrijk.

1798:

Het **Bureau voor den Waterstaat** wordt opgericht. Dat krijgt de volgende taken:

- Zorg voor rivierdijken.
- Zorg voor zeedijken en zeeweringen.
- Zorg voor binnenlandse waterstaat (droogmakerijen, aanleg van wegen, kanalen en sluisen, oppertoezicht op heemraadschappen en dijkscolleges en onderzoek ten behoeve van verbetering van waterwerktuigen).

1799:

Alle belangrijke waterstaatswerken komen onder direct toezicht van het rijk.

1801:

De provincies krijgen een groot deel van de waterstaatswerken in beheer terug.

1806 - 1810:

Lodewijk Napoleon, de broer van de keizer, neemt de heerschappij over de Noord-Nederlanden over van Schimmelpenninck, wanneer de keizer het gezien internationale ontwikkelingen raadzaam acht de Republiek nog strakker aan Frankrijk te binden.

1808:

De Algemene Dienst wordt opgericht, waarin sterk wordt gestreefd naar systematisering en verwetenschappelijking van verkeer- en waterstaatszaken. Diverse rangen en standen worden geïntroduceerd in de organisatie.

1810: - 1813:

Na de vernietiging van een groot deel van de Nederlandse vloot door de Engelsen in 1809 worden de Noordelijke Nederlanden ingelijfd bij het Franse keizerrijk, net als de Zuidelijke dat al waren in 1795. De te geliefde en te zelfstandig opererende Lodewijk Napoleon wordt teruggeroepen.

1810:

Het Waterstaatscorps gaat op in de Franse **Service des Ponts et Chaussées** en de provincies worden Franse departementen.

1814:

De Franse heerschappij over de Noordelijke Nederlanden wordt beëindigd.

1816:

Voor de interne organisatie van de Waterstaat wordt een nieuw functie- en rangenstelsel ingevoerd. De Inspecteur-Generaal is de ambtelijke topfunctionaris en onder hem vallen de inspecteurs, hoofd-ingenieurs en ingenieurs. Daaronder komen de aspirant-ingenieurs, conducteurs en pikeurs.

1819:

De verhouding tussen rijk en provincie in de waterstaatszorg wordt duurzaam geregeld. De belangrijkste waterstaatswerken vallen nu onder direct beheer van het rijk, de provincies krijgen de meeste andere werken onder hun hoede. Zij oefenen ook het toezicht op de provinciale waterstaatswerken uit.

De vraag dringt zich op of de Franse overheersing niet van invloed is geweest op de wijze waarop Rijkswaterstaat destijds vorm heeft gekregen. Sterker nog, wellicht kunnen Franse concepties van infrastructuurplanning van weleer nog steeds licht werpen op de wijze waarop in Nederland tegenwoordig wegen en vaarwegen worden aangelegd en dijken worden beheerd. Op bepaalde momenten in de geschiedenis worden beslissingen genomen of vinden veranderingen plaats die voor het verdere verloop van ontwikkelingen van doorslaggevend belang blijken te zijn. Zulke momenten zijn in de sociaal-wetenschappelijke literatuur **critical junctures** (Krasner 1984, 1988) genoemd. Het proces waarin eens in de zoveel tijd cruciale paden worden ingeslagen die de toekomst inkaderen, wordt **padafhankelijkheid** genoemd (Arthur 1994).

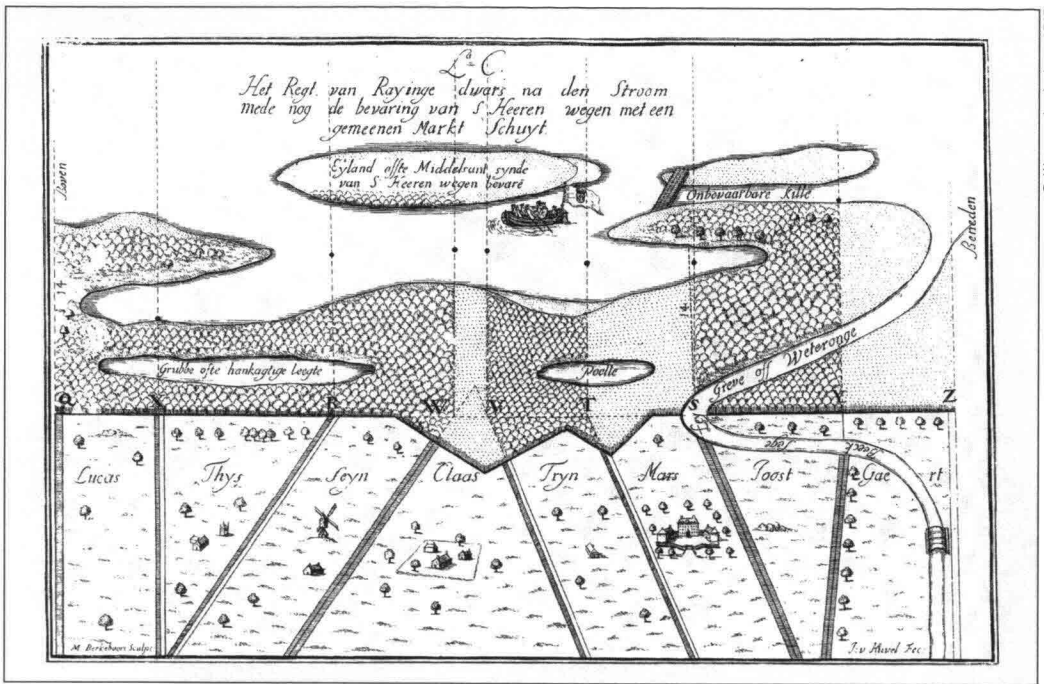
Op deze plaats worden drie vragen beantwoord:

- Kunnen de huidige organisatievorm en het huidige opereren van Rijkswaterstaat en zijn regionale directies worden begrepen in het licht van zijn geboorte in de Franse tijd? Met andere woorden: was 1798 een **critical juncture** (paragraaf 1)?
- Hoe zien de huidige praktijken van infrastructuurplanning eruit in Frankrijk en Nederland? Hebben deze in de afgelopen 200 jaar overeenkomstige ontwikkelingen gekend, of zijn ze uit elkaar gaan lopen (paragraaf 2)?
- Hoe kan de organisatorische positie waarin Rijkswaterstaat zich anno 1998 bevindt, worden begrepen en voor welke uitdaging ziet hij zich geplaatst in de toekomst (paragraaf 3)? Is er sprake van een nieuw kruispunt dat tot verschillende toekomstige paden leidt?

1. RIJKSWATERSTAAT EN DE BATAAFSE PERIODE

Staatsrechtelijke veranderingen onder de Fransen In de periode voorafgaande aan de inval van de Fransen in de drassige en verarmde Republiek der Zeven Verenigde Provinciën vormden de gewesten een verband zonder centraal gezag dat hun autonomie bedreigde. Deze federale, intergouvernementele opzet was historisch gegroeid, maar gezien ontwikkelingen elders in Europa na de Franse revolutie niet langer onomstreden. Er was in staatsrechtelijke en bestuurlijke kringen een controverse ontstaan tussen de meer traditionele federalisten en de door verlichtingsideeën en staatssturing geïnspireerde unitaristen.

De federalisten deelden over het algemeen een oriëntatie op de bestuurlijke traditie waaruit de Zeven Provinciën waren voortgekomen en waren in maatschappelijk opzicht behoudend. Ze waren tevreden met het decentrale stadhoudelijke gezag en gruwden van hoofdstedelijk bestuur door imperialistische keizers of monarchen. De meer progressieve unitaristen waren daarentegen juist geboeid door het gedachtengoed rond de drieëenheid **vrijheid, gelijkheid en broederschap** en zagen in een gezaghebbende nationale staat het medium bij uitstek om maatschappij en bestuur te moderniseren. Het post-revolutionaire Frankrijk diende als lichtend voorbeeld bij de vraag hoe zulke ideeën konden worden geïntroduceerd en verspreid in de achtergebleven moeraslanden. De unitaristen waren voorstanders van een eenheidsstaat naar Frans model. Tot 1795 was overneming van dit Franse model zowel in de Noordelijke als in de Zuidelijke Nederlanden kansloos. Er heerste bij de welvarende burgerij, ondanks de economische teruggang, relatief grote tevredenheid over de vigerende bestuurspraktijk en deze elite verzette zich zoveel mogelijk tegen verandering.



Het rivierrecht diende niet alleen ter bescherming van de rivier maar ook ter regeling van het recht van aanwas.

De Franse inval wijzigde de machtsverhoudingen tussen de federalisten en de unitaristen echter radicaal. De Zuidelijke Nederlanden werden bij Frankrijk ingelijfd en kwamen onder het gezag van Parijs, terwijl de Noordelijke Nederlanden meer en meer verwerden tot een vazalstaat van Frankrijk. Deze militair-strategische omwenteling had voor de Nederlanden grote staatsrechtelijke en bestuurlijke implicaties. In termen van die tijd betekende het de overwinning van de unitaristen op de federalisten: de Haagse Staten-Generaal werden eindelijk gekozen en hoefden niet langer via intergouvernementele unanimitieit tot beslissingen te komen, maar mochten functioneren als een supraprovinciaal orgaan, dat op allerlei gebied taken van de gewesten overnam. De gewesten werden in het vervolg ook departementen genoemd en kregen steeds vaker te maken met van rijkswege gearacheteerde nationale functionarissen.

Bij deze staatsrechtelijke wijziging dringt zich meteen de parallel met Frankrijk op. De toenmalige provincies in Frankrijk, ook daar departementen genoemd, vervulden een functie als gedeconcentreerde uitvoerder van beleid dat in de hoofdstad werd uitgestippeld. De aan het gezag van de koning of keizer ontleende bevoegdheden kwamen ofwel in de plaats van lokale bevoegdheden ofwel werden parallel daarmee opgericht. De nationaal benoemde prefect stond aan het hoofd van zo'n departement en was de vertegenwoordiger van Parijs in de regio, die in onderhandeling trad met lokale bestuurders. In de Nederlanden was het tot 1795 min of meer andersom geweest. Soevereiniteit lag bij de Provinciën en als Den Haag sprak, was dat uit hun naam. Van beleidsuitvoering op last van Den Haag en georganiseerd door vertegenwoordigers van het rijk in de regio, kon al helemaal geen sprake zijn. De toename van de centrale macht en gelijktijdige afname van provinciale en lokale autonomie kende tussen 1795 en 1806 overigens enkele pendelbewegingen onder invloed van rivaliserende groepen die meer of minder unitaristisch gezind waren. De trend richting de vorming van een eenheidsstaat was echter onmiskenbaar en onomkeerbaar, vooral na 1806.

Waterstaatbestuurlijke veranderingen onder de Fransen De staatsrechtelijke omwenteling die in Nederland heeft plaatsgevonden in de Bataafse tijd, is ook voor de infrastructuur en het waterbeheer van meer dan theoretisch gewicht geweest. Waterbouwkundigen die tot op dat moment hadden geklaagd dat met interprovinciale afstemming de dijken onvoldoende konden worden versterkt, omdat het lokaal bestuur te verbrokkelde opereerde en voornamelijk ad hoc landmeters inhuurde, kregen de kans de verkeer- en watersector vorm te geven zoals ze dat al lang wensten. Systematisch dijkbeheer en integrale verkeersplanning vergden nationale coördinatie en getooid met de nieuwe naam ingenieur konden ze die realiseren op bureaucratisch-hiërarchische wijze. Daarnaast hoeft men de nog immer gangbare namen **Rijkswaterstaat** en **regionale directies** maar in herinnering te worden geroepen om de oorsprong ervan te doorzien. De gedachte dat ze geënt werden op, of een natuurgetrouwe kopie waren van het prestigieuze Corps des Ponts et Chaussées en zijn uitvoeringsorganen door heel Frankrijk, ligt voor de hand.¹

Dit Parijse orgaan werd bevolkt door goed geschoolde technocraten, die een hoge waarde toekenden aan integrale nationale planning van netwerken en daarvoor hun specialistische kennis inzetten. Om nauwlettend te kunnen toezien op de uitvoering van door technische specialisten opgestelde planning, werd aanleg van infrastructuur overgedragen aan betrouwbare vertegenwoordigers in de 95 departementen, niet samenvallend maar parallel met het gangbare lokale bestuur. Dobbin (1994) schreef over de Franse aanpak van de aanleg van spoorwegen, een andere infrastructuursector, in de 19de eeuw:

Deputies, ministry officials, engineers and railroad officials saw private decision-making as problematic because it (1) used cost as the primary consideration in decisions, rather than quality and dependability, (2) was oriented to current customer demand, rather than to the nations long term goals and (3) depended on the unproven technical abilities of private engineers and administrators rather than the proven expertise of state technocrats (Dobbin 1994: 132).

Deze denkwijze is ook onverkort toepasbaar op de planning en uitvoering van andere infrastructurele werken, onder andere die bij de Waterstaat.

Na de Franse inval in de Zuidelijke Nederlanden werd daar een model identiek aan het Franse geïntroduceerd, dat tot de samenvoeging met de Noordelijke in 1830 zou blijven bestaan. En tijdens de vasalisering van de Noordelijke Nederlanden werd daar de weg geëffend voor de regionale directies, die rijksbeleid mochten uitvoeren om de aloude provincies heen. De nieuw verworven positie van deze directies betekende een definitieve en tot op heden onomgekeerde omwenteling voor het binnenlands bestuur in Nederland met betrekking tot de ruimtelijke besluitvorming. Ze luidde de vaak betreunde verzwakking van de provincies in Nederland in, in het bijzonder die van hun doe-gehalte.

Met de transplantatie van de Franse eenheidsstaat naar de Nederlanden was de weg vrij voor deconcentratie in plaats van decentralisatie van infrastructuurplanning en waterbeheer. Afwegingsprocessen in de regio geschieden in het vervolg door vertegenwoordigers van de centrale overheid en niet langer door de decentrale overheden zelf. Met andere woorden, 1798 is achteraf inderdaad een critical juncture gebleken, zij het dat eigenlijk de reeks van beslissende veranderingen zich met enige strubbelingen voltrok in de gehele periode 1795 - 1810.

In Frankrijk en het toenmalige België kon het centraal gezag vrij goede controle uitoefenen over de departementen/provincies en konden ze zelf benut worden door Pont et Chaussées.²

Maar omdat Nederland aanvankelijk 'maar' een vazalstaat was, bleek Lodewijk Napoleon niet van zins een systeem in te voeren dat de bestaande provincies zou inschakelen voor rijkstaken. Hij koos de veilige weg door de uitvoering van waterbeheer en infrastructuur om hen heen te organiseren met nationale ingenieurs in de regio. Daar ligt de oorsprong van het fenomeen regionale directies. De oude provinciën bleven bestaan, maar werden gereduceerd tot coördinatoren van ruimtelijke planvorming en tussenschakel tussen rijk en gemeenten, zonder veel belangwekkende bevoegdheden in de infrastructuursector en ook zonder geld om op eigen houtje activiteiten te ondernemen.

2. RIJKSWATERSTAAT EN ZIJN FRANSE TIJDGENOTEN

Nederland en het 'oud-Franse model' In twee eeuwen kan veel gebeuren.

Maar aan de hoofdstructuur van het destijds ontworpen besturingsmodel is in Nederland nauwelijks meer iets veranderd. Met de aanneming rond 1850 van een nieuwe Grondwet, een nieuwe Gemeentewet en een nieuwe Provinciewet in de tijd van Thorbecke is weliswaar juridische autonomie erkend aan de lagere overheden en met de introductie van de Wet op de Ruimtelijke Ordening in 1965 is de basis gelegd voor decentrale ruimtelijke planvorming, maar dit alles gebeurde binnen nationale kaders. De regionale directies hebben hun functie als tussenschakel tussen Den Haag enerzijds en provincies, gemeenten en waterschappen anderzijds, ongeschonden behouden.³ Zij zijn het die nog altijd de behoefte aan infrastructuurprojecten en dijkverzwaringen in de regio inventariseren en daarvan een kloppend nationaal geheel maken. Zij wegen de sociaal-economische, vervoerskundige, milieukundige en veiligheidswaarde ervan af met behulp van in Den Haag ontwikkelde evaluatiemethoden. Vervolgens spiegelen ze de projecten aan doelen en richtlijnen zoals deze in het rijksbeleid zijn geformuleerd en vragen het hoofdkantoor om financiering.

Het ontstaan van andere Directoraten-Generaal binnen het Ministerie van Verkeer en Waterstaat en de laatste reorganisatie (**kanteling**) in 1997 hebben daarin niets fundamenteel gewijzigd. De beleidsdirecties binnen het ministerie formuleren het algemene verkeer- en vervoersbeleid, maar Rijkswaterstaat is niettemin een apart Directoraat-Generaal gebleven, dat de planning van infrastructurele werken in concreto realiseert en het eerste aanspreekpunt is voor de regio. Meer in algemene zin hebben de hoge waardering voor specialistische ambtenaren en de functioneel-hiërarchische opbouw binnen de Waterstaat de tand des tijds grotendeels ongeschonden doorstaan, hoewel het maatschappelijk verzet ertegen is toegenomen.

Men zou kunnen beweren, dat Nederland voor 1795 een federatie was, tussen 1795 en 1851 een centralistische eenheidsstaat en daarna een gedecentraliseerde eenheidsstaat en de klok dus enigszins is teruggedraaid. Maar daar staat tegenover dat de financiële verhoudingen in de sector (en andere sectoren) sindsdien even centralistisch zijn gebleven, zo niet nog centralistischer zijn geworden. Het eigen belastinggebied van de lagere overheden in Nederland is zeer beperkt en ook de inkomsten uit provincie- en gemeentefonds kunnen bijzondere uitgaven nooit dekken (Van der Dussen 1990). Zouden wij dit besturingsmodel 'typisch Frans' noemen, dan zien we één cruciaal punt over het hoofd. Er is in Frankrijk in de afgelopen twee eeuwen namelijk wel veel veranderd.

Frankrijk en het nieuw-Franse model In Frankrijk is het functioneren van de eenheidsstaat na verloop van tijd uitgemond in een vergroeiing tussen lokale bestuurders en de nationale vertegenwoordigers in de regio. Zo sterk zelfs dat het departement momenteel niet langer kan worden gezien als een pure uitvoerder van staatsbeleid,

Terwijl Rijkswaterstaat het 200-jarig bestaan viert, is het befaamde Corps des Ponts et Chaussées opgeheven.

maar op weg is volgroeid en zelfstandig lokaal bestuur te worden, vooral sinds de socialisten aan de macht kwamen in 1981 (Page & Goldsmith 1987). De nationaal benoemde prefect wordt tegenwoordig geflankeerd door een lokaal gekozen *Commissaire de la République*, die voor hem in de plaats is gekomen voor taken die geen uitvoering van nationaal beleid betreffen.

Nog steeds worden door het departement nationale taken uitgevoerd, maar de greep van de regio daarop is verstevigd. Een van de redenen daarvoor is ook geweest het bestaan van diverse dubbelfuncties: politici hebben posities op verscheidene overheidsechelons en kunnen op die manier het behartigen van nationale belangen combineren met het dienen van lokale doelen. De prefectuur is er daar een van. Daarnaast is er nog een ander bestuursniveau, de *région*, dat zich qua schaal tussen staat en departement in bevindt en sterk in opkomst is. Veel infrastructuurplanning van enig gewicht vindt plaats in onderhandeling tussen de staat en deze diverse *régions*, die over het algemeen over redelijke eigen geldbronnen beschikken⁴ en op basis van gelijkheid met de staat zogenaamde financieel bindende *contrats de plan* afsluiten over aan te leggen infrastructuurprojecten voor de komende vijf jaar.⁵ Bovendien, ook zij worden inmiddels democratisch gekozen.

Meer in algemene zin is de bestuursfilosofie in Frankrijk geworden, dat alle openbare lichamen de infrastructuur voor hun eigen schaal realiseren, waarbij co-producties soms wel voor de hand liggen. Dit is gezien de financiële verhoudingen in Nederland onmogelijk. Het financiële aandeel van de rijksoverheid bij lokale en regionale infrastructuur en de detaillering en het aantal op- en afritten op Nederlandse snelwegen doen vermoeden, dat de nationale overheid ook infrastructuur aanlegt voor de provinciale en lokale schaal.

Terwijl Rijkswaterstaat zijn 200-jarige bestaan viert is in Frankrijk het befaamde *Corps des Ponts et Chaussées* opgeheven en gesplitst in diverse onderdelen. De gedachte dat beleidsvorming en beleidsuitvoering van elkaar gescheiden kunnen worden is daarbij het belangrijkste richtsnoer geweest. Beleidsvorming hoort bij ministeries thuis, terwijl uitvoering van eenduidige beslissingen en richtlijnen verzelfstandigd of eventueel privaat kan gebeuren. Volgens Martinand (1994) stoelt ook deze praktijk op een langer bestaande Franse traditie:

The French system is the antithesis of the Anglo-Saxon approach, both in its structure and in its set of guiding principles. It was founded on a tradition which combines the notion of empowering an interventionist State-Colbertism with a legal formulation of public service. It was inspired by an idea which has been debated ever since the 17th century: the State's interest in calling on private enterprise is that work gets done and done well. With this reasoning, the question of goods or services should be as important as the question of cost. To be sure of the results obtained, the public authority must call on private companies in solid financial positions; consequently, monopolies or oligopolies are created. It then becomes necessary to distinguish between the construction and operation phases. Public works engineers have perfected a complex methodology for the supervision of construction projects. Concerning the operation of public service networks, conditions are somewhat different. The use of pragmatic approaches and the guarantee of trust between the partners are two central factors; the importance of these factors grows as the focus moves away from major national networks towards technical urban networks. The concessionaire is subjected to very little supervision in its every day management of the network, since it is performing with long term objectives under a long term contract. However, in exchange for these benefits, the company is required to achieve specific results and to guarantee the continuity of operations it has been vested (Martinand 1994: 37).

De infrastructurele beleidsvorming is terecht gekomen bij het *Ministère de l'Équipement, des Transports et du Tourisme* (METT), waarin de *Direction des Routes* bijvoorbeeld alle wegenplanning voor haar rekening neemt en functioneert naast de *Direction des Transport Terrestres*, dat verantwoordelijk is voor de spoorwegenplanning. Overgebleven is wel het *Conseil des Ponts et Chaussées*, nog steeds een belangrijk adviesorgaan op het desbetreffende beleidsterrein. De organisatie van de beleidsuitvoering is nog sterkere mate aangepast. Een aanzienlijk deel van het praktische toezicht op bouwactiviteiten en uitvoering van publieke werken is in handen gekomen van zelfstandige organisaties, zoals de *Voies Navigables de France* (VNF) voor vaarwegen en de *Sociétés d'Économie Mixte* (SEM) voor wegen, die met behulp van tolheffing en leningen bij staatsfondsen binnen rijksregels, maar met een hoge mate van autonomie, infrastructuur aanleggen en beheren. De *Sociétés d'Économie Mixte* bijvoorbeeld zijn de privaatrechtelijke bouwers en beheerders van tolwegen (*péages*), waarvan de aandeelhouders overwegend publiek zijn. Zij dragen exotische namen met afkortingen als AREA, ASF, ESCOTA, SAPN, SAPRR en ACOBA en de enige werkelijk private luistert naar de naam *Cofiroute*.

SEMs halen hun financiële middelen uit tolopbrengsten, eigen vermogen of verevening tussen hun verschillende lijnen.⁶ Ze zijn gerechtigd tot het zelfstandig lenen van middelen op de kapitaalmarkt en stellen zich op als marktpartijen die concurrenten willen weren en monopolist willen blijven. In werkelijkheid valt het met het competitieve gedrag nogal mee, daar ze elk een bepaald gedeelte van het land bestrijken en bovendien overwegend zachte leningen afsluiten bij staatsfondsen. Ten slotte blijken sommige ondernemingen (of sommige bestreken geografische gebieden) winstgevender te exploiteren dan andere. De staat stond harde concurrentie tussen de SEMs niet toe en stelde een **vereveningsmoeder** voor alle SEMs in (*Autoroutes de France*), die geld afroemt bij sterk winstgevende bedrijven en het herverdeelt.⁷

Het belangrijkste effect van deze 'privatisering' is geweest, dat managementvraagstukken uit de gepolitiseerde besluitvormingssfeer zijn gehaald. Indicaties van de doorlooptijd van aanleg geven inderdaad aan dat SEMs erin slagen geplande wegen te realiseren binnen enkele jaren, terwijl wegen die nog steeds van staatswege worden aangelegd (de *Routes Nationales*, die door het departement in opdracht van METT worden aangelegd) daar soms dertig jaar voor nodig hebben (Kolpron 1993). Overigens blijkt het opereren van SEMs niet alleen voordelen te hebben ten opzichte van de 'klassieke' aanleg via de publieke sector; SEMs verdienen weinig of geen geld met goed onderhoud van wegen en besteden daar dan ook minimale aandacht aan.⁸

Om kort te gaan, het bovenstaande maakt duidelijk dat er zich in Frankrijk sinds het einde van de 18de eeuw juist grote veranderingen hebben voorgedaan.⁹

3. RIJKSWATERSTAAT EN ZIJN MOGELIJKE TOEKOMSTEN

Een gemengd en verward institutioneel systeem Hiervoor bleek de behoudendheid en consensusgerichtheid van bestuurlijk Nederland ertoe te leiden dat, vergeleken met Frankrijk, een aantal fundamentele stelselwijzigingen met vertraging of totaal niet kon worden doorgevoerd. Helemaal aan het einde van de 18de eeuw geschiedde de invoering van de eenheidsstaat onder de Franse overheersing en halverwege de 19de eeuw kwam via Thorbecke het nodige aan Duits gedachtengoed over de **organische staatsleer** een aantal cruciale Nederlandse staatsrechtelijke wetten binnen; reden waarom nu van een gedecentraliseerde eenheidsstaat wordt gesproken.

De hele Nederlandse bestuurlijke geschiedenis lijkt overigens doortrokken te zijn van inspiratiebronnen over de grens. Momenteel lijkt de meer op flexibiliteit, financiële sti-



Fransen troepen trekken over de bevroren Waal, 1794.

mulering en ad-hoc-organisaties gerichte benadering uit de Angelsaksische wereld dominant te zijn in het vaderlandse referentiekader. In het laatste geval is een gebrek aan bewustzijn over de bestaande staats- en bestuursrechtelijke kaders en tradities aanleiding tot wetsaanpassingen in de sectoren transportinfrastructuur en dijkversterking. De meeste hiervan beogen de doorlooptijd van besluitvormingsprocessen te verminderen door vanuit de ruimtelijk-relevante sector aanpassingen te plegen op het regime van de Wet op de Ruimtelijke Ordening. Hoewel de formele doelstelling luidt dat diverse losstaande sector- en facetprocedures parallel worden geschakeld, wordt tegelijkertijd met deze parallelschakeling de bindende werking van de door de gemeente vastgestelde bestemmingsplannen ondergraven.

Zonder expliciet de keuze te maken de decentrale opzet van de WRO omver te gooien of ondergraven, zijn er de laatste tijd diverse ad-hocwetten aanvaard die het laatste inhoudelijke oordeel en de controle over tijdsbesteding steeds systematisch bij de lagere overheden weghalen om hen niet de kans te bieden de besluitvorming af te remmen of saboteren. En na aanpassingen in de Tracéwet, het Nimbywetje, de Rijkswegen-procedure, de Deltawet Grote Rivieren en de Wet op de Waterkering is de stroom cosmetische regelgevende ingrepen vermoedelijk nog niet ten einde. In zijn huidige vorm en context is de WRO kennelijk meer een handicap dan een aanwinst voor infrastructuurplanning geworden. In een meer federaal institutioneel stelsel zou dat vermoedelijk anders zijn. De hele filosofie achter de recente 'snelheidswetgeving' is echter niet federalistisch of zelfs decentraal, maar centralistisch.

Het betoog is hier niet zozeer dat federalisten of unitaristen gelijk hebben, maar veel meer dat beide invloedssferen zich tegelijkertijd in het Nederlandse bestel bevinden en elkaar mogelijk tegenwerken of tegenspreken. Nederland vormt zo een mengvorm of mixité van Frans, Duits en Angelsaksisch gedachtengoed. Dit kan verfrissend werken of leerzaam zijn en het kan ook tot een vorm van vitaliteit leiden zoals we die terugvinden

in het geroemde poldermodel voor de sociaal-economische sector. Maar daar is dan wel inzicht en bewustzijn in de samenhang tussen de diverse tradities voor nodig. Het alternatief is namelijk een volstrekt onbegrip over hoe bijvoorbeeld snelheid van besluitvorming kan worden bevorderd en welke maatregelen daarvoor nodig zijn. Het gebrek aan doorzichtigheid is ook merkbaar in de verwarring die is ontstaan over onder- of overuitputting van budgetten. Daar Nederland voor zover mij bekend namelijk het enige land is waar alle verkeersplannen en -projecten dienen te worden opgenomen in de ruimtelijke plannen en de afwegingen zelfs officieel via het ruimtelijke circuit verlopen, zijn het juridische en het financiële afwegingstraject los van elkaar komen te staan. Financiering is namelijk altijd gekoppeld aan sectorale bouwplannen en niet aan ruimtelijke afwegingen. Op die manier zijn goedkeuringen volgens WRO en Tracéwet enerzijds en betalingen uit het Infrastructuurfonds volgens het Meerjarenprogramma Infrastructuur en Transport (MIT) anderzijds ontkoppeld geraakt, met alle verwarring vandien. In alle andere landen zijn de afwegingen sectoraal gebeven en is de band met de financiële planning daarom behouden. Daar waar het ontbreekt aan historisch, wets-systematisch en cultureel bewustzijn over de positie van Nederland, krijgen misvattingen met betrekking tot de organisatie van besluitvorming hun kans.

De hang naar vernieuwing De ontevredenheid over het verloop van de besluitvorming, zowel bij de infrastructuurplanning als bij het dijkbeheer, is de afgelopen jaren toegenomen. Men verwijt Rijkswaterstaat een te technocratische aanpak en een te langzame besluitvorming. Het lijkt erop alsof het geldende 'oud-Franse stelsel' nog maar beperkt aan de eisen van de tijd voldoet. De directeur-generaal van Rijkswaterstaat constateert ook zelf dat de eisen en wenselijkheden met betrekking tot het functioneren van zijn organisatie in twee eeuwen tijd stevig zijn veranderd:

Onze deskundigheid is steeds meebewogen met de maatschappelijke ontwikkelingen. Een maatschappij die steeds mondiger werd. Men wil meepraten over het nut en de noodzaak van projecten. Ook tijdens de uitvoering blijft men kritisch meekijken. En, terecht! Technische deskundigheid alleen is anno 1998 niet meer genoeg. Een waterstater van nu moet oog hebben voor de omgeving en voor de bredere maatschappelijke belangen. (...)

Voorheen deden we veel zelf. Geen brug was te ver, geen tunnel te diep. Dat is het nog niet, alleen is onze rol anders. Rijkswaterstaat formuleert het eisenpakket of de randvoorwaarden op basis daarvan maakt het bedrijfsleven een ontwerp of een product. Rijkswaterstaat gaat zich minder bemoeien met het uitwerken van het ontwerp en de uitvoering. Van meewerkend opdrachtgever worden we meer en meer regisserend opdrachtgever. (...) Het is grappig om te constateren dat wij in de afgelopen 200 jaar steeds opnieuw zijn geconfronteerd met heftige publieke discussies. Dit heeft natuurlijk ook weer alles te maken met de wijzigingen in het maatschappelijke denken. In het begin hadden de burgers behoefte aan een krachtige, centrale Rijkswaterstaat; een staat in de staat. Toen de burger mondiger werd kwam ook de behoefte aan openheid. (...) Alhoewel we die openheid belangrijk vinden zijn we volgens onze omgeving niet open genoeg. In 1998 is op dit terrein nog genoeg werk aan de winkel. Ik vind het werken aan grotere openheid een speerpunt voor dit jubileumjaar en voor de komende jaren. Laten we de trend vasthouden die zo'n twee jaar geleden is ingezet, namelijk onze taken uitvoeren in open dialoog met onze omgeving (RWS Nieuwjaarsrede 1998: 5-7).

In diverse projecten, bijvoorbeeld Integrale Prioriteitstelling Hoofdinfrastructuur (PI), Infraplan, Wegverlichting en nog enkele andere, wordt onderzocht hoe de besluitvor-

ming kan worden gemoderniseerd en de interactie met de maatschappelijke omgeving kan worden geïntensiveerd. Gezien de voorafgaande paragrafen is het ook interessant de vraag te stellen hoe daarbij gebruik kan worden gemaakt van voorbeelden uit het buitenland. Ditmaal niet onder invloed van vreemde overheersing, maar op basis van institutionele transplantatie, dat wil zeggen het doordacht overplanten van constructies uit omliggende landen lettend op wenselijkheid en passendheid op de Nederlandse situatie (De Jong 1998).

Gesteld dat de institutionele structuur rond Rijkswaterstaat wordt aangepast aan 'de nieuwe tijd' en dat een nieuwe critical juncture daartoe de mogelijkheid biedt, wat zijn dan de mogelijke ontwikkelingsrichtingen? In de afsluitende paragraaf worden behalve het bestaande model drie alternatieven gepresenteerd, te weten de institutionele structuren zoals deze bestaan in de drie landen die de opbouw en positie van Rijkswaterstaat in het bestuurlijk bestel diepgaand hebben beïnvloed. Door naar hun kenmerkende verschillen te kijken, evenals naar hun functioneren en voor- en nadelen, kunnen verschillende perspectieven voor de toekomst van Rijkswaterstaat worden geschetst.

Een uitgangsmodel en drie alternatieve institutionele modellen In de voorgaande paragrafen is het waterstaatbestuurlijk stelsel in Nederland gekarakteriseerd als 'oud-Frans'. Het had de volgende kenmerken:

- 1 Een groot nationaal beleidsvormend en financierend ministerie met een hiërarchische opbouw
- 2 Uitvoering (aanleg en beheer) door gedeconcentreerde diensten, regionale directies genaamd
- 3 In alle geledingen een hang naar technisch perfecte oplossingen op basis van deskundigheid
- 4 Zwakke lagere overheden met weinig financiën en hooguit coördinerende bevoegdheden
- 5 Burgers die hun mening op publieke besluitvorming tijdens ruimtelijke inspraakprocedures ventileren.

Als deze vijf hoofdkenmerken worden beschouwd als institutionele variabelen, verdwijnt de vanzelfsprekendheid van de huidige situatie. De variabelen achter de Nederlandse kenmerken kunnen als volgt worden benoemd:

- 1 Taken en opbouw van het nationale ministerie
- 2 Instanties waardoor aanleg en beheer plaatsvindt
- 3 Gehanteerde kwaliteitsmaatstaven voor besluitvorming over infrastructuur
- 4 Inbreng van lagere overheden bij de afweging van infrastructuur
- 5 Momenten voor betrokkenheid van belanghebbende partijen.

Bij het terug in herinnering roepen van het 'nieuw-Franse model' kunnen we constateren of in de variabelen 2, 3 en 4 wijzigingen zijn opgetreden.

■ Een belangrijk gedeelte van de fysieke aanleg en het beheer van wegen wordt uitbesteed aan semi-private tolbedrijven, die daarin gespecialiseerd zijn. Slechts een gedeelte is bij de departementale diensten gebleven. Aanleg en exploitatie van de waterwegen zijn eveneens verzelfstandigd (variabele 2).

■ Hoewel de beslissers in Frankrijk nog steeds bekend staan om hun hang naar technische optimalisatie, zijn gelijkmatige ruimtelijke spreiding van infrastructuur over

het hele land en een bedrijfsmatige aanpak van aanleg en exploitatie veel sterker op de voorgrond getreden. Een verzelfstandigde of private verantwoordelijke trekker voor de organisatie is hieraan een belangrijke bijdrage. Dit resulteert in grotere daadkracht en hogere snelheid in de besluitvorming (variabele 3).

- De gedeconcentreerde diensten zijn in de loop van de tijd steeds sterker vergroeid met het lokale bestuur, waardoor de lokale binding van de uitvoering is vergroot. In de departementen is het onderscheid tussen autonoom lokale taken en uitvoeringstaken voor Parijs soms nauwelijks meer te maken. De hoeveelheid eigen middelen van lagere overheden is eveneens toegenomen, wat de omgang tussen de diverse overheidsniveaus egalitaarder heeft gemaakt en geresulteerd in onderlinge financiële contracten en co-producties (variabele 4).

De vernieuwingen die afgelopen decennia in het Franse systeem zijn doorgevoerd, verdienen serieuze aandacht. Het zou voor Nederland inhouden, dat conform de officieel levende wensen de scheiding tussen beleid en uitvoering wordt verscherpt. De beleidsvormende taken van het Hoofdkantoor worden geabsorbeerd binnen het centrale ministerie in Den Haag. De uitvoerende taken worden ofwel verzelfstandigd ofwel in privaat beheer onder publieke garanties gezet ofwel overgedaan naar de regionale directies die samengroeien met provincies of regionale instanties. In een aantal opzichten voldoet het Franse model aan het gewenste toekomstperspectief voor Rijkswaterstaat: het is sneller en bedrijfsmatiger en biedt meer ruimte voor decentrale en private inbreng. Op deze onderdelen kan het een grote inspiratiebron zijn. Anderzijds heeft het nieuw-Franse model ook grote nadelen: de bureaucratie op nationaal niveau is niet ingetoomd en op variabele 5, burgerinspraak, bestaan zelfs nog minder voorzieningen dan in Nederland: daar zijn de inspraakprocedures in de ruimtelijke ordening ook afwezig. De openheid naar burgers toe is daarom nog beperkter dan in Nederland.

We kunnen echter nog andere modellen als inspiratiebron oproepen, te weten het **Germaanse** model (Duitsland en Zwitserland) en het **Angelsaksische** model (Engeland en de Verenigde Staten). Het Germaanse model wordt gekarakteriseerd door de volgende elementen:

- Een relatief kleinschalig nationaal ministerie dat alleen over de aan te leggen infrastructuurprojecten beslist, daar uitvoering en ruimtelijke inpassing volledig tot de competentie van de deelstaat of kanton behoren (variabele 1)

- De deelstatelijke of kantonale bouwdiensten zijn verantwoordelijk voor aanleg en onderhoud, die dus in de publieke sfeer zijn gebleven. In Duitsland heeft de meerderheid van de deelstaten een formaat dat zich bevindt tussen dat van Nederland en zijn provincies in. In het sterk federale Zwitserland zijn de kantons juist kleiner dan de Nederlandse provincies (variabele 2)

- Er is via de ontwikkeling van intermodale afwegingsmodellen voor de afweging van infrastructuur (Duitsland) of de ontwikkeling integrale vervoersconcepten (Zwitserland) gewerkt aan inhoudelijke consensus tussen de diverse publieke partijen. Daarin zijn aspecten als kosten, economische groei, ruimtelijke kwaliteit, milieubeheer en veiligheid officieel als aandachtspunten erkend. Consensusvorming en verbreding van het aantal betrokkenen heeft snelle besluitvorming als focus verdrongen (variabele 3)

- De lagere overheden zijn belangrijke medefinanciers van infrastructuur en komen omdat ze een cruciale bijdrage leveren, automatisch vroeg in beeld. Bovendien bekostigen en organiseren ze de besluitvorming van hun eigen infrastructuurnetten vrijwel volledig (variabele 4).

- Burgers genieten net als in Nederland inspraak in het proces van ruimtelijke

inpassing. In die zin wijkt de situatie niet af van die in Nederland. In Zwitserland komt daar echter de rol van de volksraadpleging bij. Dit aspect vergroot de maatschappelijke betrokkenheid en openheid, maar leidt niet tot een grotere publieke consensus (variabele 5).

Het Germaanse model wijkt zoals blijkt sterker af van het onze, maar is ten eerste beloftevol door zijn aandacht voor een brede oriëntatie op inhoudelijke belangen die bij infrastructuurafweging zijn gemeoid. Een breder bestuurlijk en in consensus uitmondend debat over aspecten die met aanleg van wegen en vaarwegen zijn gemeoid biedt de Waterstaat grote kansen de openheid te vergroten. Ten tweede springt de meer harmonische relatie tussen de nationale en lagere overheden in het oog, doordat ze elkaar meer als gelijke partners beschouwen. Het rijk heeft niet vrijwel alle financiële middelen in handen en kan daarom niet in de verleiding komen lagere overheden slechts als hindermacht te beschouwen.

Om zo'n idee te realiseren moeten ofwel regionale/provinciale infrastructuurfondsen tot stand komen ofwel het eigen belastinggebied sterk worden uitgebreid.

Tenslotte kan Rijkswaterstaat zich laten verleiden door de moderne verlokkingen van het Angelsaksische model, want dit heeft de volgende eigenschappen:

- Een sterk afgeslankt kerndepartement met daaromheen of los daarvan veel autonome, verzelfstandigde of geprivatiseerde agentschappen, zelfstandige bestuursorganen en diensten. Deze kennen alle hun eigen taakstellingen en zijn vaak weer van elkaar afhankelijk voor de verwezenlijking daarvan. De besturen van deze zelfstandige organisaties worden via coöptatie benoemd (in Engeland) of door leden of burgers gekozen (de Verenigde Staten). In het laatste geval heeft dit de openheid van het bestuur voor burgers vergroot (variabele 1)

- Waar mogelijk wordt financiering en uitvoering niet langer onder duidelijk overheidsgezag gerealiseerd, maar in publiek-private samenwerking, waartoe in **package deals** tussen vele partijen wordt besloten. Het eigenbelang van elke organisatie in dit netwerk staat daarbij centraal (variabele 2)

- Dit heeft tot gevolg dat ook kwaliteit niet langer exclusief vanuit waterstaatsbelangen wordt bepaald, maar dat de commerciële en financieel-economische inzet van private partijen een belangrijke rol gaat spelen. De innovativiteit van de oplossingen kan door de koppelingen van diverse inzichten ook worden vergroot (variabele 3)

- Zowel nationale als regionale en lokale overheden zijn gewonere partijen geworden. Natuurlijk zijn ze nog steeds de hoofdbetaler van infrastructuur, maar door de verbinding met aanleg of renovatie van bedrijventerreinen en woningbouw ontstaan er toch consortia waarin hun afhankelijkheid van private belangen sterk is vergroot (variabele 4)

- De betrokkenheid van private partijen is veel minder gestructureerd dan in elk van de andere modellen. Over financiële middelen uit de private sector moet al duidelijkheid bestaan ver voordat de fysieke aanleg begint, vaak al relatief aan het begin. Ook burgers kunnen hun mening geven op hoorzittingen die voorafgaan aan genomen besluiten en niet na afloop via inspraakprocedures (variabele 5).

De invoering van het Angelsaksische model in de polder zou betekenen, dat er een kerndepartement ontstaat met vele diensten daaromheen. Realisatie van projecten wordt een kwestie van onderhandeling tussen vele partijen die er alle iets van hun gading in kunnen terugvinden. Package deals tussen diverse autonome nationale, regionale, lokale en private partijen worden gewoon en iedere besluitvormingsconstruc-

tie worden min of meer incidenteel en ad hoc.

Een duidelijke hoofdstructuur wordt slechter herkenbaar. De specialistische diensten Dienst Weg- en Waterbouwkunde (DWW), Bouwdienst, Meetkundige Dienst (MD), Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV), Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) en Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) komen in ieder geval op afstand te staan. De regionale directies (Noord-Nederland, Oost-Nederland, Utrecht, Noord-Holland, Zuid-Holland, Zeeland, Noord-Brabant, Limburg, IJsselmerengebied, Noordzee) komen of onder regionaal bestuur of worden ook zelfstandig.

De bedrijfsmatigheid en openheid van de besluitvorming worden in dit model vergroot en voldoen in die zin dus aan de wensen die in de afgelopen tijd ten aanzien van het functioneren van Rijkswaterstaat zijn geformuleerd. Ook komen er veel meer innovatieve oplossingen voor het voetlicht van beslissers. De openheid en ongestructureerdheid werken wel vooral in het voordeel van assertieve burgers en projectontwikkelaars en voldoen daarom niet aan het klassieke beeld van meer democratische besluitvorming; het kan het beter *managerial* worden genoemd.

TENSLOTTE Het optreden van critical junctures, cruciale kruispunten van wegen, in de ontwikkeling van institutionele systemen is per definitie nooit te voorspellen. Met gebruikmaking van het voordeel achteraf historische gebeurtenissen te mogen duiden, is de periode van de Franse overheersing en bezetting in dit artikel onderkend als critical juncture in de ontwikkeling van de waterstaatsector. Een onomkeerbare trend in de richting van centralisatie en professionalisering van het bestuur werd ingezet. Deze had het onschatbare voordeel wegverbindingen en stroomgebieden met een nationaal of interregionaal bereik bestuurlijk te behandelen als nationale of interregionale kwesties. De unitarisering is voor Nederland met recht een broodnodige modernisering geweest. Zonder goed opgeleide ingenieurs was menig kunstwerk niet tot stand gekomen. Deze institutionele hervorming was echter niet van de ene op de andere dag een feit; de vorming van de eenheidsstaat en de vertakkingen daarvan naar de waterstaat kenden een pendelbeweging in de jaren 1795 - 1810 en zelfs daarna. Federalisten wisselden unitaristen soms af op relevante machtsposities en draaiden de klok soms gedeeltelijk terug. Toch moesten ook zij proefondervindelijk vaststellen dat volledige provinciale autonomie rond 1800 niet meer aan de eisen van de tijd voldeed.

Anno 1998 heeft het er alle schijn van dat Rijkswaterstaat opnieuw op een cruciaal kruispunt van wegen is beland. Al enige tijd krijgt Rijkswaterstaat ondanks zijn ontegenzeggelijke technische deskundigheid, kritiek te verwerken op het terrein van maatschappelijke ontvankelijkheid en omgang met lagere overheden. In alle opzichten zijn de klachten gericht tegen de resultaten van de 'verfransing' van de Waterstaat twee eeuwen geleden: technische deskundigheid volstaat niet meer voor maatschappelijke probleemoplossing en lokale en provinciale infrastructures vereisen maatwerk en verdienen het daarom door lokale en provinciale overheden bestuurd te worden. Ook worden bij Rijkswaterstaat steeds meer posities bezet door ambtenaren die de centralisatie en verwetenschappelijking van 1798 anno 1998 willen ombuigen tot decentralisatie en vermaatschappelijking. Unitaristen krijgen ondanks hun nog immer overwegende invloed op de huidige regelgeving meer en meer tegenstand van federalisten, al heten die nu anders. Ook nu zal heroriëntatie vermoedelijk een pendelbeweging kennen.

Zo werd in 1990 al een decentralisatie van de besluitvorming over en financiering van de lokale infrastructuur en waterkering aangekondigd, maar deze is in de jaren daarna

weer weinig consequent doorgezet. Provincies hebben vrijwel geen eigen middelen en gemeenten ontvangen ondanks de zogenaamde gebundelde doeluitkering (GDU) nog steeds 95% van de kosten voor lokale infrastructuur van het rijk. De waarde van burgerinvloed en brede maatschappelijke discussie wordt van alle zijden met instemming begroet, maar er wordt bezuinigd op inspraakprocedures en er is nog weinig zeker over de definitieve vormgeving van de open-planprocessen.

De institutionele hervorming is duidelijk nog niet af. Paragraaf 3 doet de federalisten drie modellen aan de hand waaruit ze kunnen putten voor de modernisering van het Nederlands bestel. Maar er is ook een verschil met 1798: er is geen buitenlandse overheerser die helpt de institutionele impasse te doorbreken. Nederland moet zelf op zoek naar buitenlandse voorbeelden en die aan zichzelf opleggen. De onmogelijkheid instituties van buiten geïmplant te krijgen is vervelend, omdat Nederland nu zelf verantwoordelijk is voor zijn vernieuwingen. Maar dit heeft ook een belangrijk voordeel: instituties kunnen nu uit vrije keuze worden getransplanteerd, op basis van bewuste inschattingen over wenselijkheid en passendheid. En wellicht kan het jubileumjaar 1998 over twee eeuwen vreugdevol als critical juncture worden herdacht.

NOTEN

- 1 Al verwijzen geschiedkundige bronnen zelden expliciet naar een Franse oorsprong. Dat veranderde overigens nadat Lodewijk door zijn oppermachtige broer uit Nederland werd teruggeroepen in 1810 en Nederland daadwerkelijk bij Frankrijk werd ingelijfd. Toen werd de Waterstaat officieel de 16de divisie van de Ponts (De Wilde, persoonlijke mededeling). We kunnen echter wel aannemen, dat waar tegenwoordig de dominante militaire en economische invloed van Angelsaksische landen zich vertaalt in culturele en bestuurlijke hegemonie, dat destijds voor Frankrijk gold. De Franse inval creëerde het momentum voor de radicale invoering van Franse ideeën in het Nederlandse openbaar bestuur.
- 2 Nadat België in 1839 onafhankelijk werd, trad Jean-Baptiste Vifquain (1789 - 1854), die als ingenieur ervaring had opgedaan in het Nederlandse Waterstaatscorps daar in dienst en introduceerde in België ruwweg dezelfde structuren als in Nederland, inclusief aparte regionale directies.
- 3 Het ontstaan van de Provinciale Waterstaat, die verantwoordelijkheid draagt voor de provinciale wegen en vaarwegen en in de jaren 1880 ontstond, mag hierbij overigens niet onvermeld blijven.
- 4 De enige uitzondering daarop is Ile de France, de region rond Parijs zelf, waarop de nationale overheid de greep blijikbaar in het geheel niet wenst te verliezen.
- 5 In tegenstelling het Nederlandse Meerjarenprogramma Infrastructuur en Transport (MIT), dat een eenzijdig nationaal document is, is het contrat de plan zoals de naam al zegt een overeenkomst tussen twee gelijkwaardige partijen.
- 6 Om preciezer te zijn, het zijn staatsondernemingen waarvan alle aandelen in handen zijn van publieke organen, zoals de staat (voor minimaal 51%), de régions en andere publieke ondernemingen. SEMs leggen weliswaar aan uit eigen middelen, maar het grootste deel van hun geld betrekken ze uit de Caisse Nationale des Autoroutes, die door de staat wordt beheerd. De leningverschaffende commissie bepaalt de hoogte van de uit te geven middelen en tevens de hoogte van de tolgelden. Deze Caisse wordt op haar beurt weer gevuld met middelen uit de nationale begroting, regionale bijdragen voor projecten en leningen door banken en beleggers (Sweers 1993: 16). Hoewel er een tendens bestaat de SEMs steeds vrijer te laten in hun financiële activiteiten, blijkt de overheid toch een stevige greep te hebben op het doen en laten van de >private= SEMs. Dat geldt veel minder sterk voor hun managementtaken.
- 7 Overigens komen deze semi-private ondernemingen pas aan de bak op het moment dat het tracé in hoofdlijnen vastligt en de bouwconcessie is verleend. De invloed op politieke afwegingen van SEMs is minimaal, zo niet afwezig.
- 8 De VNF vervult een vergelijkbare functie voor de Franse vaarwegen, zij het dat zij zich vooral concentreren op het onderhoud van vaarwegen en dit bekostigen met opcenten op de plage en heffingen op het gebruik van hydro-electrische energie. Gezien de beperkte mogelijkheden die er bestaan in Frankrijk om het vaarwegennet uit te breiden en tezelfdertijd enigszins kostendekkend te houden, is van aanlegactiviteiten bij de VNF niet echt sprake.
- 9 Er zijn uiteraard ook opmerkelijke overeenkomsten gebleven. Zo wijst Tegelaar (1993: 53) er terecht op, dat in beide landen de grote steden via informele lobby veel machtiger zijn dan de kleine gemeenten.

REFERENTIES

- Arthur, W. Brian: Increasing returns and path dependence in the economy, The University of Michigan Press, Ann Arbor 1994.
- Dobbin, Frank: Forging industrial policy: the United States, Britain and France in the railway age, Cambridge University Press, New York 1994.
- Driessen, A.M.A.J.: Watersnood tussen Maas en Waal; overstromingsrampen in het rivierengebied tussen 1780 en 1810, Walburg Pers, Zutphen 1994.
- Dussen, J.W. van der: De financiële verhouding; een inleiding, VUGA Den Haag 1990.
- Jong, W.M. de: Institutional transplantation; how one can copy good transport infrastructure decision-making from other countries, forthcoming in 1998.
- Krasner, Stephen D.: Approaches to the state; alternative conceptions and historical dynamics, in: Comparative politics, Vol. 16 no 2, 223-246, 1984.
- Krasner, Stephen D.: Sovereignty. An institutional perspective, in: Comparative political studies, Vol 21 no 1, 66-94, 1988.
- Kolpron Consultants BV: Besluitvorming over grote infrastructuurprojecten in een aantal Europese landen; deel 2 landenrapportage 1993.
- Martinand, Claude: Private financing of public infrastructure; the French experience, Ministry of Public Works, Transportation and Tourism, Paris 1994.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat: Nieuwjaarsrede van de Directeur-Generaal van de Rijkswaterstaat 1998, publikatie in het kader van Rijkswaterstaat 200 jaar, V&W 1998.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat: Jaarbericht Rijkswaterstaat 1996, mei 1997.
- Page, Edward C. and Michael J. Goldsmith: Central and local government relations; a comparative analysis of West European unitary states, Sage, London 1987.
- Schama, Simon: Patriots and liberators; revolution in the Netherlands 1780 - 1813, Fontana Press, London 1977.
- Sweers, Michiel: Financiering van infrastructuur in Europa, doctoraalscriptie i.o.v. de Adviesdienst Verkeer en Vervoer, 12 april 1995.
- Tegelaar, Jan: Strategische ruimtelijke sturing; een Frans-Nederlandse systeemvergelijking, Delfste Universitaire Pers 1993.
- Toussaint, H.C.: Uitgemeten en uitgetekend; de geschiedenis van de algemene dienst van de Rijkswaterstaat, intern Verkeer & Waterstaat onderzoeksdocument, oktober 1997.
- Tweede Kamer der Staten-Generaal: Vergaderjaar 1990-1991, 22.236 nr 1, Decentralisatie.
- Tweede Kamer der Staten-Generaal: Vergaderjaar 1997-1998, 21.136 nr 26, Kustverdediging na 1990.

WAT **EERST**:

WONEN, WATER, WEGEN

OF WELVAART?

Wat aanvankelijk een verband lijkt,
blijkt soms toeval

4 T.M. De Jong



Is onze infrastructuur stuwend of volgend? Hebben wij Nederland te danken aan ons vernuft of danken wij ons vernuft aan onze locatie in het stroomgebied van de grote rivieren? Deze bijdrage behandelt de oorzakelijke verbanden in de Nederlandse waterhuishouding. Terwijl in het kort de middeleeuwse geschiedenis van Holland wordt herschreven, concludeert de auteur dat causaliteit aan schaal en tijd is gebonden. Het eerstgeboorterecht wisselt. Wat eerst een verband lijkt, blijkt soms toeval. Een pleidooi bij de toekomstig inrichting van Nederland niet uitsluitend gefixeerd te zijn op weg- en waterbouw, omdat dit het gevaar van eenvormigheid en maakwerk in zich bergt.



Aan de Technische Universiteit Delft bestaat uiteraard verschil van inzicht tussen civieltechnici en bouwkundigen over het primaat van stroom- of verblijfsfuncties in de Ruimtelijke Orde. Dit debat is in deze bundel voelbaar in de bijdragen van Huisman c.s.¹ en Sanders² enerzijds en Meijer³ anderzijds. Als stedenbouwkundige sluit ik me in eerste instantie van nature aan bij collega Meijer. Een dak boven het hoofd staat vanzelfsprekend voorop, dan komen werk, vervoer, voorzieningen en recreatie. Bovendien: je kunt wel over stromen spreken, maar die moeten toch ergens vandaan komen en ergens heen gaan? De evolutie heeft ons eerst eencelligen, vervolgens meercelligen en pas lang daarna de vaatplanten opgeleverd. Eerst de cellen, dan de vaten, leert het leven dus. Als ecooloog moet ik echter weer nuanceren: alles leeft onder voorwaarde van geregelde aanvoer, want wat moet het leven zonder aanvoer van zonlicht, water en mineralen? Deze stromen zijn **voorwaarden** voor het leven. Dit artikel wil beide al te deterministische opvattingen door hypothesen van schaalgeleding in ruimte en tijd nuanceren.

WONEN EN WEGEN De vraag of infrastructuur stuwend dan wel volgend is bij stedelijke ontwikkeling deed zich indringend voor, toen we enkele jaren geleden voor NNAO⁴ het computerspel Momentum maakten. Het werd een applicatie waarmee je in twintig minuten Nederland kon ontwerpen tot in het jaar 2050 door de kaart per km²

van bestemming te veranderen. De computer gaf een eenvoudige technische, economische en politieke effectrapportage bij iedere ingreep. De ontwikkeling van het programma stopte bij het infrastructurele effect. Bij hoeveel nieuw stedelijk gebied en bij welke concentratiegraad daarvan was een extra snelweg noodzakelijk en waar kwam die dan precies te liggen? Was de aanwezigheid van infrastructuur niet veeleer oorzaak van verstedelijking en kon je de speler niet beter een netwerk laten ontwerpen en de verstedelijking als effect daarvan laten rapporteren? We bedachten een compromis: de speler zou de eerste 10 jaar bestemmingen mogen wijzigen, waarop de computer met infrastructuur zou reageren en het volgende decennium mocht de speler infrastructuur ontwerpen, waarop de computer met verstedelijking zou reageren. Men zou dit de hypothese van het cyclisch primaat kunnen noemen, een kip- en ei-oplossing. Daarbij doet zich de vraag voor welke timing dit 'op twee benen lopen' vergt: wie bij het lopen te lang op één been vertrouwt valt om of moet hinkelen. Tien jaar is willekeurig en te lang. Als het wonen te lang op wegen moet wachten trekt men weg. Als wegen te lang op klandizie moeten wachten krijgt men exploitatieproblemen.

WEGEN EN WELVAART Behalve een academische discussie is dit ook een politieke discussie die zich toespitst tussen Economische Zaken, de ministeries van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening & Milieu en Verkeer & Waterstaat. De oude gedachte dat je de sociaal-economische ontwikkeling kunt bevorderen door aanleg van infrastructuur heeft ons bijvoorbeeld in het Noorden lege havens en snelwegen opgeleverd, maar blijft voortleven in de keuze van ICES-projecten. Het effect is moeilijk aan te tonen omdat bij uitvoering de vergelijking met een ontwikkeling zonder uitvoering niet meer kan worden gemaakt. Tegenstrijdige onderzoeksconclusies zouden echter eens naar schaal geordend moeten worden.

Dan zou kunnen blijken dat de conclusies niet tegenstrijdig zijn omdat zij schaalafhankelijk zijn. Stel: de Kanaaltunnel heeft groot effect op de Europese economie, de infrastructuur in het noorden van ons land echter weinig op de nationale economie. Regionaal (straal ca. 30 km) is de aanleg van infrastructuur echter weer van groot belang voor de regionale economie, maar lokaal (straal ca. 10 km) en in een straal van 3km (stadsniveau) weer minder en zo voort (zie bijgaande lijst).

Deze hypothese is aanvechtbaar, maar maakt ons in elk geval opmerkzaam op de mogelijkheid dat causale verbanden aan schaal gebonden kunnen zijn. Daarom is de

Schaalwisselingshypothese

| Niveau | Straal in km | Infrastructuur |
|-----------|--------------|----------------|
| Europees | 300 | Stuwend |
| Nationaal | 100 | Volgend |
| Regionaal | 30 | Stuwend |
| Locaal | 10 | Volgend |
| Stad | 3 | Volgend |
| Wijk | 1 | Stuwend |
| Buurt | 0,3 | Volgend |



Veen, vaart, vracht, vertier.

afgelopen jaren bij afstudeerrichting Stedebouwkunde van de faculteit Bouwkunde TU Delft een strikt schaalgelede benadering gebruikelijk geworden. Voor een poging tot toetsing van een hypothese als bovenstaand is dat eerste vereiste.

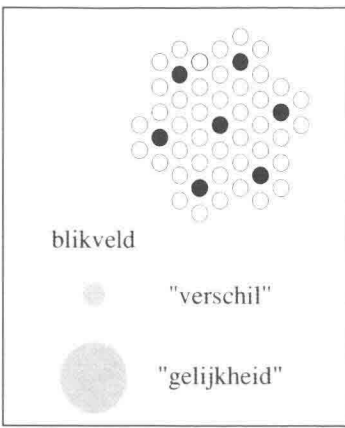
SCHAALGELEDING Deze benadering berust op de ontdekking dat bij tal van stedebouwkundige redeneringen 'schaalvervalsing' mogelijk is wanneer men de argumenten aan een ander schaalniveau ontleent dan waarop de gevolgtrekking wordt toegepast. Dit is niet alleen aan de orde bij bovenstaande vraag, maar bijvoorbeeld ook bij de scheiding van wonen en werken. De straal waarbinnen de industriële hinder werd vastgesteld was veel kleiner dan de straal waarbinnen wonen van werken vanaf de jaren '40 werd gescheiden. De schaalgelede benadering maakt bovendien paradoxale begrippen van ontwerpers zoals 'gebundelde deconcentratie' begrijpelijk en toelaatbaar.

In figuur 1 is weergegeven dat eenzelfde ruimtelijk patroon verschillende gevolgtrekkingen toelaat wanneer men met een verschillend blikveld (schaalniveau, korrel) elementen in de beschouwing betreft.

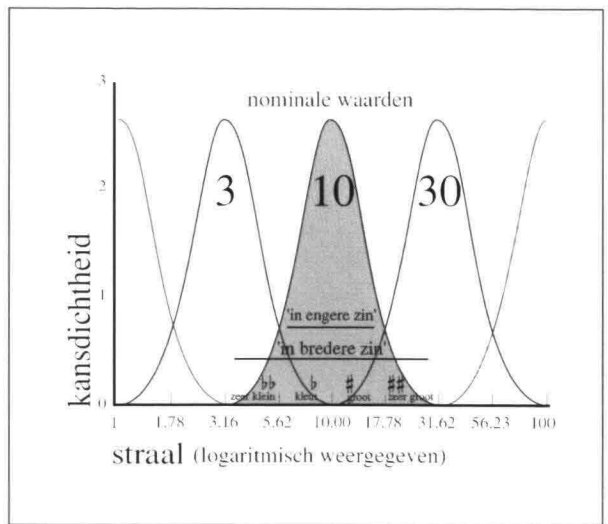
Betrekt men bijvoorbeeld telkens één cirkeltje en zijn omgeving in de beschouwing, dan moet men verschil constateren, terwijl men gelijkheid moet constateren wanneer men telkens groepjes van zeven met hun omgeving vergelijkt. Iets dergelijks geldt voor de beschouwing van binnen naar buiten en van buiten naar binnen.

Figuur 1 toont bovendien aan dat zulke spraakverwachtingen al mogelijk zijn bij een factor 3 lineair schaalniveauverschil.

Wat is er in die eeuw gebeurd? Reconstructie laat een ongeëvenaarde kolonisatie van het lage land zien.



FIGUUR 1: Schaalparadox.



FIGUUR 2: Namen en grenzen van stedenbouwkundige categorieën.

Dit was aanleiding om stedenbouwkundige categorieën (redeneringen, tekeningen, legenda-eenheden) systematisch een factor van ca. 3 uitéén te leggen.

Een element uit de bijna logaritmische stedenbouwkundige reeks [1, 3, 10 ..] is de naam (nominale waarde) van een 'elastische' stedenbouwkundige categorie die aan weerszijden reikt tot die van de naastliggende categorieën. De naamgevende 'nominale' straal $R=10$ is dan de mediaan van een kansdichtheidsverdeling van de logaritme van stralen tussen (afgerond) $r=3$ en $r=30$, met een standaarddeviatie van 0,15.

Er is gekozen voor een reeks stralen (en niet: diameters), omdat in Nederland een gebied met een straal van {0,3 , 1 , 3 km} goed overéénkomt met wat in de volksmond [buurt , wijk , stadsdeel] of losliggend [gehucht , dorp , stad] heet. Deze termen worden echter alleen gebruikt om de omvang van een gebied aan te geven en hebben dus geen enkele andere functionele betekenis dan 'potentie' voor functies. Bovendien zijn bovenstaande toleranties zo groot dat een bebouwd gebied met een straal van 3 km als 'stad', maar ook nog juist als 'zeer groot dorp' kan worden aangeduid, zoals in de muziek een dubbel kruis (# #, dubbele verhoging) van een a een a# # (a_{is}=b) maakt.

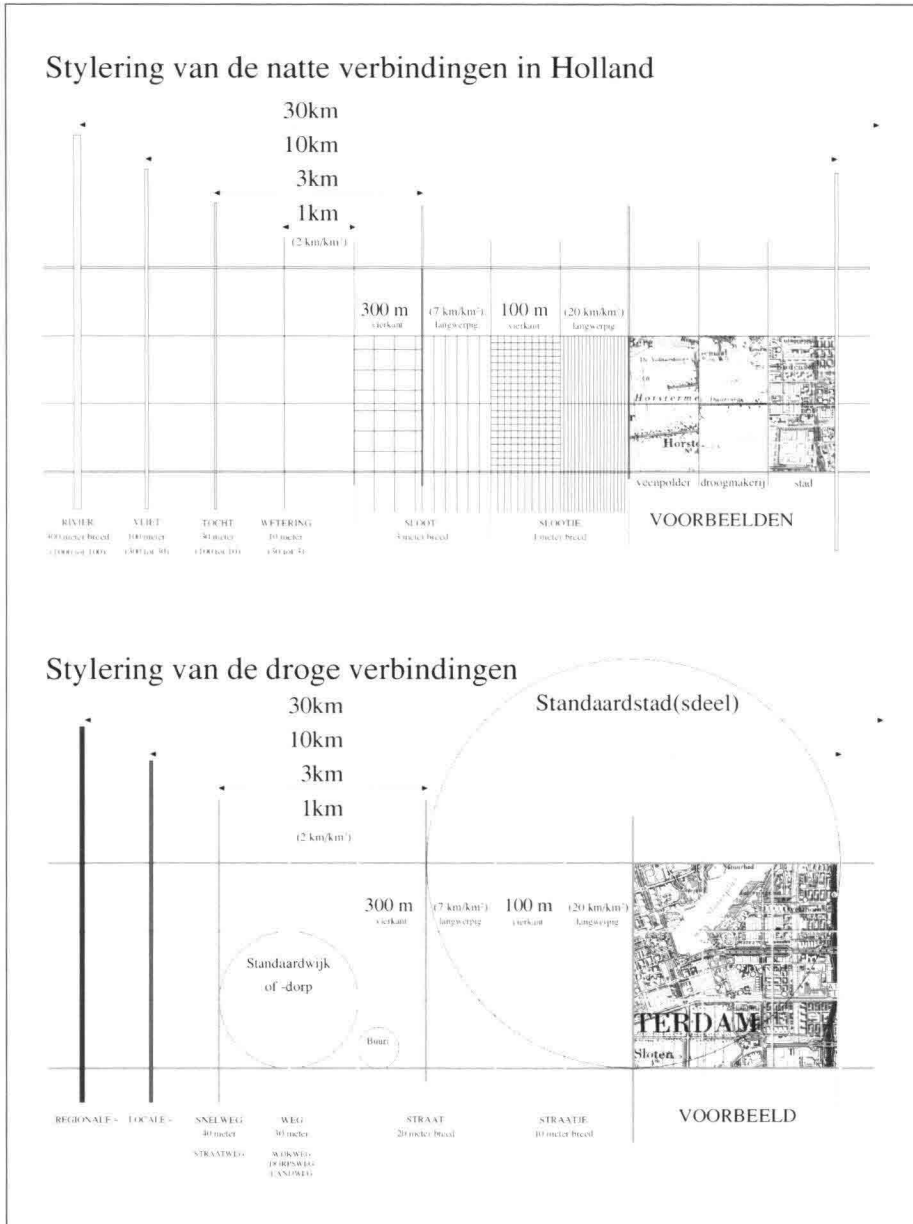
SCHAALGELEDE NAAMGEVING

Vervolgens blijkt ook het stelsel van droge en natte verbindingen in zijn naamgeving (snelweg, autoweg, stadsautoweg, wijkweg, buurtweg, vlekontsluitingen, perceelontsluitingen, alsmede rivier, vliet, tocht, wetering, sloot, greppel) in deze semi-logaritmische reeks te kunnen worden geïnterpreteerd.

In figuur 3 zijn de op deze manier enkele onderscheiden ordes naast elkaar weergegeven. Rechts is telkens een voorbeeld van de laagste ordes uit de topografische kaart gegeven. Daaruit blijkt al dat niet overal alle ordes vertegenwoordigd zijn. De dekking is niet volledig. De ontwatering van een veenpolder geeft bijvoorbeeld het meest volledige stelsel van slootjes, sloten, weteringen enzovoort. Een droogmakerij van een veenafgraving waarbij klei aan de oppervlak komt, mist de slootjes en begint bij de orde van de sloten. Stedelijk gebied mist ook de sloten en begint bij het raster van (kleine) weteringen. In zandgebieden vervallen vervolgens ook de weteringen en tochten. Men kan

dus van de topografische kaart al aan de hand van de dekking met bepaalde maaswijdte iets constateren over de ondergrond. De beeksystemen op de hogere gronden worden geïnterpreteerd als 'kleine vlieten'.

Bij de droge verbindingen geldt iets dergelijks. Alleen het raster van 'wegen' (1 km) is landsdekkend, verder geeft het schema oningevulde 'potenties' voor verstedelijking weer. De topografische kaart toont vrijwel overal in Nederland om de kilometer een weg. Daarboven begint het niet-landsdekkend stelsel van snelwegen: de (stads)snelwegen, lokale snelwegen, regionale, nationale, bovennationale en continentale snelwe-



FIGUUR 3: Natte en droge verbindingen vanaf een maaswijdte van kleiner dan 30 kilometer.

gen. Met dit instrumentarium kan de schaalwisselingshypothese in een beter onderzoekbare vorm worden herschreven:

| Morfologische classificatie | Dichtheid in km/km ² | Maaswijdte in km | Hypothese |
|-----------------------------|---------------------------------|------------------|-----------|
| Continentale snelwegen | 0,002 | 1000 | Volgend |
| Bovennationale snelwegen | 0,007 | 300 | Stuwend |
| Nationale snelwegen | 0,02 | 100 | Volgend |
| Regionale snelwegen | 0,07 | 30 | Stuwend |
| Lokale snelwegen | 0,2 | 10 | Volgend |
| Stadssnelwegen, straatwegen | 0,7 | 3 | Volgend |
| Wegen | 2 | 1 | Stuwend |
| Straten | 7 | 0,3 | Volgend |

In het kader van Het Metropolitane Debat (HMD) zijn hiervan interpretaties gegeven tot het niveau van de lokale snelwegen⁵. Deze categorieën onderscheiden zich functioneel alleen door verschil in potentiële snelheid en - daaraan gerelateerd - het uit het kaartbeeld afleesbare aantal afslagen per lengte-eenheid. Zij kunnen vooralsnog als auto-weg, spoorweg, vaarweg of als combinatie van zulke functionele categorieën worden geïnterpreteerd. Nadere functionele aanduidingen zijn in deze morfologische naamgeving vermeden om ook functiewijzigingen in de loop van de geschiedenis met gelijkblijvende morfologische namen te kunnen benoemen. De categorieën kunnen bijvoorbeeld ook een in de tijd wisselende dominantie voor het ontwerp hebben.

EEN IN SCHAAL EN TIJD WISSELLENDE DOMINATIE VOOR HET ONTWERP

Esther Balvers is als stedenbouwkundige afgestudeerd op een analyse van vijf Nederlandse wijkontwerpen uit 1930, 1960, 1990 en 2010⁶. Het laatste jaartal staat voor twee ontwerpen van Balvers zelf, waarbij zij in dit opzicht maximaal verschillende wijkontwerpen voor het Strandeiland van IJburg (Amsterdam) heeft gemaakt. De verschillen zijn gezocht vanuit de hypothese dat de stedenbouwkundig ontwerper nu eens vanuit de openbare ruimte de bebouwing ontwerpt, dan weer de openbare ruimte vanuit de omringende bebouwing en dat deze ontwerper het primaat van één van beide per schaalniveau kan wisselen.

Zij concludeerde dat het ontwerp uit 1930 op wijkniveau 'netwerkgestuurd', moet zijn ontworpen, maar op buurtniveau 'componentgestuurd', gezien de duidelijke afbakening van verschillende vlek-karakteristieken (componenten in de 'compositie' van de buurt). De infrastructuur was dus op wijkniveau stuwend (S) en op buurtniveau volgend (V) bij de bebouwing. Voor de ontwerpen uit 1960 en 1990 was dit het omgekeerde.

Laten wij deze ontwerpvarianten coderen met VS, SV en SS. Voor IJburg ontwierp zij vervolgens zowel de variant VS als SV.

De schaalwisselingshypothese laat zich dus voor differentiatie van ontwerpmethoden naar zowel schaal en tijd nader uitwerken, maar in de bestaande toestand en op hogere schaalniveaus is zij uit een oogpunt van falicificeerbaarheid vooralsnog moeilijk

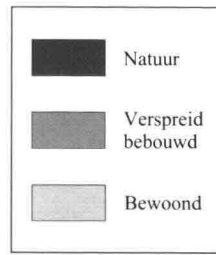
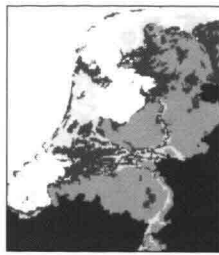
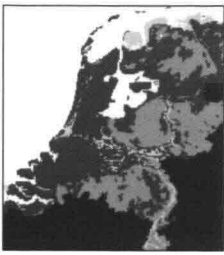
| | Wijk | Buurt |
|-------|------|-------|
| 1930 | V | S |
| 1960 | S | V |
| 1990 | S | V |
| 2010a | V | S |
| 2010b | S | V |

empirisch te onderzoeken. Het alternatief is: niet onderzoeken. Dat heeft echter een voortwoekerende mythologie op het gebied van stuwende of volgende infrastructuur tot gevolg met grote politieke gevolgen.

WATER EN WELVAART Huisman c.s. gebruikt in zijn bijdrage in deze bundel de historie om de drijvende kracht van de waterhuishouding in onze ruimtelijke orde aan te tonen. Men vaart wél waar de Waterstaat het toestaat of uitlokt. Ik kan daarin meegaan ten aanzien van ons lage land vóór de Renaissance en rekenend in perioden van 300 jaar, maar ook de tijd heeft zijn schaalniveaus. Rekenend in perioden van dertig en honderd jaar bieden de Middeleeuwen een ander beeld. Waar geen waterprobleem (meer) is, kan de economie drijvende kracht zijn en op haar beurt weer oorzaak van verdere uitbouw van de waterhuishouding. Wat eerst drijvende kracht was wordt vervolgens op sleptouw genomen. De stedelijke economie van de lage landen wordt zo drijvende kracht in het droogleggen van uitgeveende binnenwateren waarvan zij overigens ooit door haar brandstofbehoefte zelf oorzaak was.

Zodra er een economische basis aanwezig is kan vervolgens de politiek drijvende kracht worden totdat een epidemie of overstroming de samenleving weer terugwerpt op voorgaande bestaansvoorwaarden. Zo kan de geschiedenis zich in zekere zin op het pad van de voorwaardelijkheid herhalen onder wisselende krachten. In onderstaande korte weergave van de middeleeuwse geschiedenis van Holland wordt de geschiedenis in deze zin herschreven. Water is wel altijd voorwaarde voor het leven en het omgaan met teveel of te weinig aan water stelt grenzen aan de cultuur en het bestuur, maar zodra deze omgang succes heeft raakt zij op de achtergrond om andere drijvende krachten aan het werk te laten. Deze interpretatie is niet minder eervol voor de civieltechnici, maar zij laat in het laagland op hun fundament vervolgens een grote historische rol aan land- en stedebouwers (alsmede aan stedendwingers!).

BESTUUR, ECONOMIE, ECOLOGIE EN WATERHUISHOUDING VAN HOLLAND VÓÓR 1500 Evenals de Venetiërs hebben de Hollanders hun middeleeuwse verbanning naar natte streken in expansie omgezet. Holland als nu nog herkenbaar agrarisch-stedelijk complex is in de negende en tiende eeuw voorbereid en pas in de elfde eeuw echt ontstaan. Dirk II kreeg in 987 zijn leengoederen in Noord-Holland van Otto III in volle eigendom, Dirk III breidde dat eigendom naar het zuiden uit, Dirk V noemde zich in 1063 voor het eerst graaf van Holland en pas vanaf ca.1100 kwam de naam Holland voor als benaming van het hele graafschap. Wat is er in die eeuw gebeurd? De reconstructie van de Universiteit van Utrecht voor NNAO⁷ laat een ongeëvenaarde kolonisatie van het lage land zien. In 1113 verscheen



de eerste dateerbare mededeling over deelneming van boeren uit de Nederlanden aan de Oostduitse kolonisatie van veengebieden (Hollerbroek). Deze boeren waren bijzonder welkom wegens hun vaardigheid in het ontwateren van laaggelegen gebieden^{8 9 10}.

De bedijking, opstreckende verkaveling en ontwatering¹¹ van Holland deed de bevolking groeien, het veengebied klinken, en bleek weinig anders dan veeteelt mogelijk te maken. Daardoor was men in Holland op graan uit het Oostzeegebied aangewezen¹². Gelukkig voerde de Hanze haar Oostzeegoederen via de Hollandse wateren naar stapelplaats Brugge en zorgden onderweg voor rijkdom. In de dertiende eeuw kregen de meeste Hollandse steden stadsrecht.

De broer van Dirk VII, graaf Willem I had een kleinzoon. Dat was Floris V, "der keerlen God", getrouwd met Beatrix. Zijn prioriteit voor agrarische ontwikkeling door het instellen van waterschappen¹³ dreef misschien op de bevolkingsgroei door de drooglegging. Deze bevolking had haar land zelf gemaakt en dat ondergroef de legitimiteit van feodale rechten. Hij kreeg verarmende edelen als Gijsbrecht van Amstel tegen zich, hetgeen hem in 1296 zijn leven kostte. Hij trachtte kooplieden van de Hanze ertoe over te halen Dordrecht de stapel van de Oostzeehandel te verschaffen die altijd in Brugge had gelegen.

Dordrecht was het centrum van het hele Hollandse tolsysteem en had een verbreding van deze bestaansbasis uit handel nodig, evenals de Hollandse graven die uit tolheffing hun belangrijkste inkomsten kregen. In de dertiende eeuw was Hollands invloed zo gegroeid, dat Graaf Willem III (een achterneef van de vermoorde Floris V) een zus van de Franse koning kon huwen en zijn dochters kon uithuwelijken aan de Engelse koning en de Beierse keizer!

Dat laatste gaf echter hernieuwde feodale bemoeienis. De keizer viste naar de vetgeworden kabeljauw die Otto III van zijn haak had laten glijden. Daaraan ontworstelden zich de Kabeljauwse tegenstanders (zoals Delft) van het altijd door de graaf bevoorrechte Hoekse Dordrecht met ten slotte de zoon van de keizer zelf, Willem V, aan hun zijde. Zij versloegen de vrouw van de keizer, Margretha in 1351 in de slag bij Zwartewaal. Willem V werd gek, zijn neef Willem VI en zijn dochter Jacoba van Beieren weer Hoeks terwijl Dordrecht Kabeljauws geworden was.

Holland bleef in die tijd relatief vrij van pestepidemieën die in Vlaanderen en bij de Hanzesteden een demografische teruggang teweeg brachten. Brugge verloor zijn lakenschap deels aan Holland (Leiden!) waar de vissers, bevoorrecht door het inmiddels uitgevonden haringkaken¹⁴ en de verplaatsing van haringscholen uit de Oostzee naar de Noordzee op het wolrijke Engeland voeren en gaandeweg vrachtvaart op zich namen. Dordrecht moet mede onder invloed van de St. Elisabethsvloed in 1421 na 1500 zijn eerste plaats afstaan aan Delft, Rotterdam en Amsterdam. De Hollandse steden namen

na het verdrag van Utrecht in 1475 de Oostzeehandel over van de Hanze. Nog één eeuw accepteerde Holland een buitenlandse vorst om zich vervolgens definitief vrij te vechten.

VOORWAARDELIJKHEID EN OORZAKELIJKHEID Is de waterhuishouding van de elfde eeuw nu oorzaak van de economische expansie in de vijftiende eeuw? Zij dwong de Hollanders in elk geval eeuwenlang tot een vorm van plaatselijk collectieve zorg die ruzie met verdrinkingsdood bestrafte. De resulterende ondernemingszin en hoge organisatiegraad wierp ook andere vruchten af en werd vervolgens drijvende kracht. De vrijheidszin, de anti-feodale cultuur en het verzet tegen Alva's tiende penning kan uit het begrijpelijk afwijzen van een leenstelsel verklaard worden door mensen die nota bene hun eigen land gemaakt hebben. Waarom viel ons land dan in de achttiende eeuw zo terug? De drijvende kracht van de waterbeheersing was kennelijk na zes eeuwen uitgewerkt, die van ondernemingslust en vrijheidszin na drie eeuwen. Op het eind van die eeuw was de waterhuishouding door de economische terugval (in een periode van een eeuw) zo deplorabel¹⁵ dat Rijkswaterstaat onder invloed van de Fransen moest worden opgericht.

Tot eind vorige eeuw waren monocausale 'ecologische' verklaringen van economisch succes en culturele differentiatie in de geografie populair. Zij werden echter al spoedig als ontoereikend afgedaan onder de naam van 'fysisch determinisme'¹⁶. Dezelfde ecologische omstandigheden leiden immers niet altijd tot dezelfde technieken, economieën, culturen en vormen van bestuur. Men kan dan misschien niet spreken van 'oorzaak', maar nog wel van 'voorwaarde'¹⁷. Als aan minimale ecologische en technische voorwaarden zoals 'voedsel' en 'droge voeten' is voldaan, kunnen er nog allerlei verschillende economieën en vormen van landinrichting ontstaan. Welke bestaansbronnen exploreert men en in welke verhouding? Verbouwt men graan of importeert men het, leeft men van veelteelt, visserij, binnenvaart, handel, lakennijverheid, tolheffing? Dat zijn evenzovele vrijheden tot verschillende vormen van economische organisatie, culturen, en bestuursvormen bij dezelfde staat van het water.

Als die 'bovenbouw' eenmaal bestaat in de vorm van bloeiende steden en een krachtige economie, dan biedt dat weer de keuzevrijheid om omgekeerd de waterhuishouding in het lage land op nog veiliger peil te brengen, haar in stedelijke gebieden verder naar eigen hand te zetten of juist te verhuizen, 'footloose' te worden. De waterhuishouding is in het agrarische (grootste) deel van het lage land nog steeds stuwend ten aanzien van de landinrichting: de ontwateringsstructuren leggen daar door de relatief geringe investeringsdichtheid een duidelijke stempel op de verkaveling. Dat is binnen het (veel kleinere) stedelijke gebied minder het geval: daar bestaat grotere economische vrijheid tot aanpassingen. Wordt aanvankelijk de locatiekeuze van steden sterk beïnvloed door de hoogteligging, waterhuishouding of juist de ligging aan het water, nu hebben funderings- en transporttechnieken meer vrijheid geschapen voor andere prioriteiten. Nieuwe technieken leggen de ruimtelijke inrichting dus niet zozeer aan banden, alswel geven vrijheid (meer geschikte voorwaarden) tot economisch, sociaal, cultureel of bestuurlijk geïnspireerde keuzen (bijvoorbeeld het denkbeeld van een luchthaven in zee!). Naarmate het landelijke gebied verstedelijkt komt er ook meer vrijheid het land naar eigen goeddunken in te richten. Waterhuishouding is dan geen oorzaak meer van een voorspelbare inrichting, maar een technische voorwaarde voor verschillende mogelijke inrichtingen.

Causaliteit is aan schaal en tijdspanne gebonden. Wat op korte termijn als deterministisch verband verschijnt, kan op langere termijn toeval lijken. Het één pleit voor technische optimalisatie, het ander voor creativiteit. Op kleine schaal danken wij dit land aan het menselijk vernuft, op grote schaal danken wij ons vernuft aan onze locatie in het stroomgebied van de grote rivieren. Wat is oorzaak, wat gevolg? Wonen is volgens een mooie, maar niet door iedereen aanvaarde etymologie¹⁸ verwant met winnen, wennen en wanen. Kortere dan in deze drie woorden kan de geschiedenis van Nederland niet worden samengevat. Landwinning is de eerste fase in de geschiedenis van ons lage land en heeft daarin overal sporen van grote cultuurhistorische waarde nagelaten. We zijn eraan gewend geraakt. Dat is een gevaarlijke tendens wanneer we ons van de sluimerende risico's ook politiek niet meer bewust maken. Voor wie de heldere taal der techniek niet machtig is gaat veronachtzaming van zulke risico's bij eb gemakkelijk over in overdrijving bij vloed.

Voor de toekomstige inrichting van Nederland moeten we niet bij de techniek waaraan we ons woongebied danken blijven stilstaan, maar veeleer voortgaan op wat de techniek mogelijk maakt. De fascinatie voor onze weg- en waterbouw verdient een ereplaats, maar dat heeft in zich het gevaar van éénvormigheid, technische optimalisatie, rekenkundige gewenning die grenst aan behoudzucht en nostalgie. Dat is misschien goed voor de identiteit van dit land van staalmeesters als geheel, maar niet voor de herkenbaarheid van hun eigen streek, stad of huis. De causaliteit van optimale techniek, verbonden met grote, niet voor ieder helder in te schatten risico's, wint het dan van de ποησις, (poiesis, Grieks voor poëzie), het maakwerk. Het ontwerp buit bovenop dat technisch fundament lokale mogelijkheden verder uit en voegt ondernemend en vrijheidslievend nieuwe voorwaarden voor het leven toe aan wat ontwatering en ontsluiting hebben mogelijk gemaakt.

Ook dat past in de traditie van dit land.

NOTEN

- 1 Als 'maaswijde' wordt hier het speciale geval weergegeven dat de gegeven dichtheid in vierkante mazen wordt vertaald.
- 1 Huisman, P, d'Angremond, K, Schiereck, G.J., Water, dé bepalende factor voor de ruimtelijke structuur en inrichting, elders in deze publicatie.
- 2 Sanders FM., De Waterstaatsingenieur als vormgever van ons land, elders in deze publicatie.
- 3 Meijer, De verstedelijking van de infrastructuur als stedenbouwkundige ontwerp opgave
- 4 Cammen, H van der (RED.), Nieuw Nederland, onderwerp van ontwerp, Stichting Nederland Nu Als Ontwerp, Staatsuitgeverij, Den Haag, 1987
- 5 Jong, T.M. de en Paasman, M., Een vocabulaire voor besluitvorming over de kaart van Nederland, Stichting MESO, Zoetermeer, 1998. Ook verschenen in: Frieling D.H. c.s., Het Metropolitane Debat, 1998, Uitgeverij Thoth, Bussum.
- 6 Balvers E, Afstudeerwerk, <http://www.xs4all.nl/~ebalvers/afstuden/> of voor een samenvatting: <http://www.bk.tudelft.nl/d-arch/afstud/>
- 7 Reconstructie van de geschiedenis van Nederland door de UvA in opdracht van NNAO
- 8 Dr. H.P.H.Jansen, Kalendarium geschiedenis van de lage landen in jaartallen, Het Spectrum, Utrecht/Antwerpen, 1979.
- 9 Dr. H.P.H. Jansen, Algemene geschiedenis der Middeleeuwen, Uitgeverij Het Spectrum, Utrecht 1965.
- 10 Dr. H.P.H. Jansen, Kalendarium, Geschiedenis van de lage landen in jaartallen, Uitgeverij Het Spectrum, Utrecht 1979, ISBN 90-274-0492-5.
- 11 G.P. van de Ven (red.), Leefbaar laagland, uitgeverij Matrijs, Utrecht, 1993.
- 12 J.L. van Zanden en S.W. Versteegen, Groene geschiedenis van Nederland, Het spectrum, Utrecht, 1993
- 13 Dr. H.P.H. Jansen, Middeleeuwse geschiedenis der Nederlanden, Het Spectrum, Utrecht, 1965.
- 14 J. en A. Romein, De lage landen bij de zee, Querido's Uitgeverijen bv., Amsterdam 1979, ISBN 90-214-2029-5.
- 15 Auke van der Woud, Het lege land, Meulenhoff, Amsterdam 1987
- 16 Claval, Geschiedenis van de aardrijkskunde, Spectrum, Utrecht, 1976
- 17 Technische (niet: formeel-logische) voorwaardelijkheid is voor de categorie van het mogelijke wat causaliteit voor de categorie van het waarschijnlijke is Voorwaardelijkheid speelt in het ontwerpen dezelfde rol als causaliteit in het empirisch onderzoek. Zie Jong, T.M. de, Kleine methodologie voor ontwerp onderzoek, Boom, Meppel, 1992.
- 18 Vries J de, Etymologisch woordenboek, Het Spectrum, Utrecht, 1971. In Veen, PAF van, Etymologisch woordenboek, Van Dale lexicografie Utrecht/Antwerpen 1990 komt deze afleiding niet meer voor.

EEN NIEUWE **ROL** VOOR
DE WATERSTAATSINGENIEUR

Rijkswaterstaat als vormgever van
Nederland

5 F.M. Sanders

• • •

Groot is de invloed die de waterstaatsingenieur tot nog toe heeft gehad op de inrichting en vormgeving van Nederland.

Hoe gezichtsbepalend Rijkswaterstaat - direct én indirect - was, wordt hier weergegeven en geanalyseerd. Het blijft echter niet bij het verleden, want de invloed van Rijkswaterstaat als ruimtelijk vormgever zal nog groeien.

In dit hoofdstuk: de uitdagingen die toekomstige waterstaatsingenieurs wachten en waarom deze meer een regisserende dan een vakinhouderlijke rol vereisen. De nieuwe aanpak - van multidisciplinaire organisatie naar multidisciplinaire samenwerking - heeft ook consequenties voor de TU Delft, de 'leverancier' van waterstaatsingenieurs.

• • •

De waterstaatsingenieur heeft grote invloed gehad op de inrichting en vormgeving van Nederland. Deze invloed was zowel direct, door het ontwerp en de aanleg van dijken, polders, wegen en vaarwegen, als indirect, door de structurerende werking van de infrastructuur op de verstedelijking.

In kort bestek wordt hierna een historisch overzicht gegeven van deze invloed. Hierbij wordt achtereenvolgens aandacht besteed aan de ontwikkeling van de vaarwegen en de regulering van de grote rivieren, de ontwikkeling van de zeehavenverbindingen, de Zuiderzeewerken, de Deltawerken, de uitbouw van het hoofdwegennet en de vormgeving en ontsluiting van de mainports.

De indirecte invloed door de wisselwerking tussen infrastructuur en verstedelijking is een ontwikkeling van recente datum. Vanaf de Tweede Nota Ruimtelijke Ordening is er duidelijk sprake van onderlinge afstemming tussen het planologische en het infrastructuurbeleid. Bereikbaarheid enerzijds en beperking van de negatieve gevolgen van mobiliteit anderzijds zijn inmiddels de belangrijkste criteria geworden voor de plaatskeuze van nieuwe bouwlocaties en bedrijventerreinen.

Ook op de beleving van het Nederlandse landschap en de stedelijke gebieden is de vormgeving van onze wegen en bijbehorende voorzieningen van zeer grote invloed



© Facsimile uitgave van Reise- en Zakatlas, Amsterdam 1773

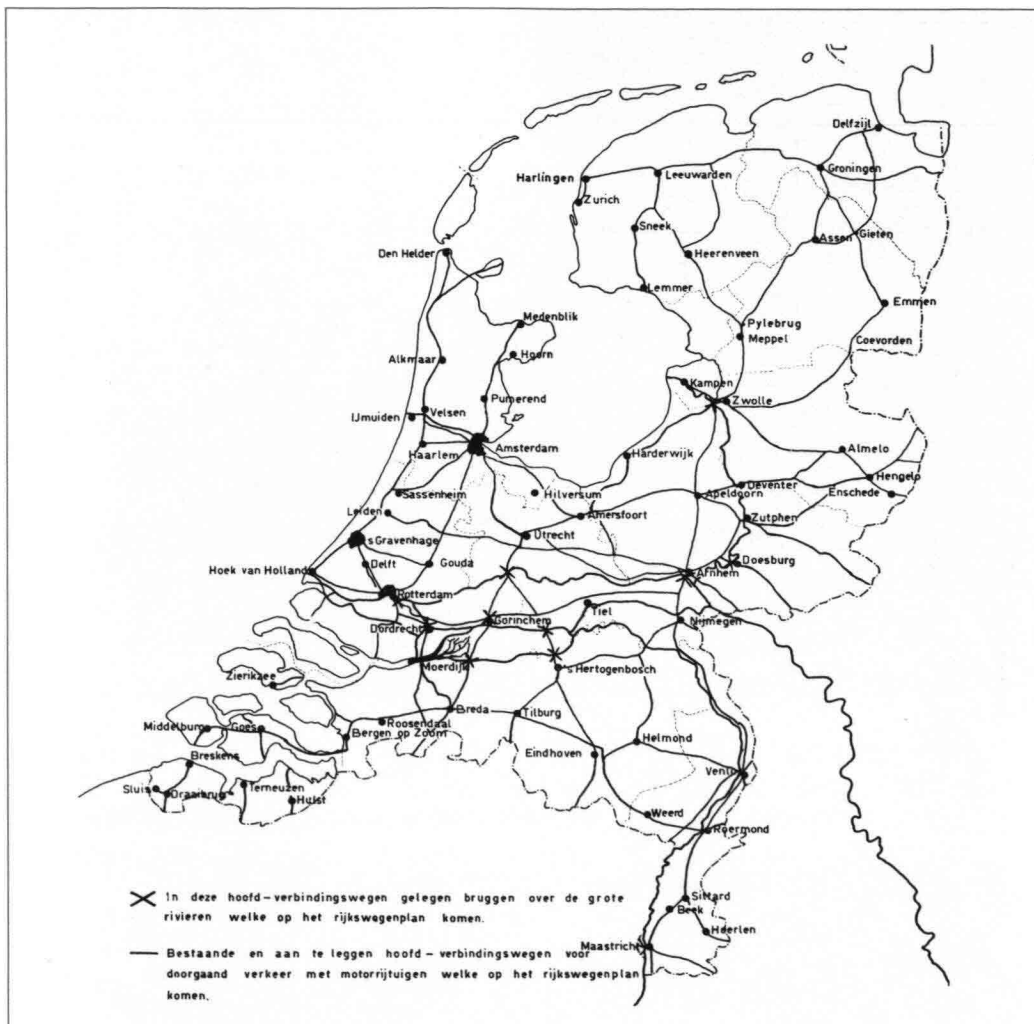
geworden. Dit geldt eveneens voor de recent uitgevoerde dijkverzwaringen en de inrichting van de Grindmaas.

De invloed van de waterstaatsingenieur op de ruimtelijke inrichting en vormgeving van Nederland zal in de toekomst naar verwachting nog groeien. Hierbij kan worden gedacht aan belangrijke vraagstukken zoals de inrichting van vervoerscorridors, de vormgeving van de hoofdinfrastructuur binnen de stedelijke gebieden, de verdere uitbouw van de mainports Rotterdam en Schiphol en de zee als bouwlocatie. Minder spectaculair, maar ook belangrijk, zijn gedachten om de versnippering van Nederland terug te dringen en de verkeersbelasting in meer landelijke gebieden een halt toe te roepen.

In deze bijdrage zal de rol van de Waterstaat als vormgever van ons land nader worden geanalyseerd. Niet alleen kijkend naar het verleden, maar vooral gericht op de toekomst. Aangegeven zal worden op welke wijze de vormgevende rol kan worden vervuld. Het ontwerpproces en de samenwerking tussen de vereiste vakgebieden staan daarbij centraal. Dit ontwerpproces is nadrukkelijk aan verandering onderhevig. Vroeger was het ontwerp vooral gericht op een zo doelmatig mogelijk functioneel ontwerp. Vandaag de dag is, behalve het functioneel ontwerp, de ruimtelijke inpassing van groot belang. In de toekomst zal het accent meer komen te liggen op het maken van een integraal ruimtelijk ontwerp waarvan de infrastructuur deel uitmaakt.

HISTORISCHE ONTWIKKELING

De taken van de Waterstaat zijn sinds zijn oprichting uitgebreid en ten dele gewijzigd. Aanvankelijk vervulde de Waterstaat een toezicht houdende rol bij de waterstaatszorg. In 1789 werd een technische dienst opgericht ter ondersteuning van het ministerie dat de waterstaatszorg behartigde. De dienst was

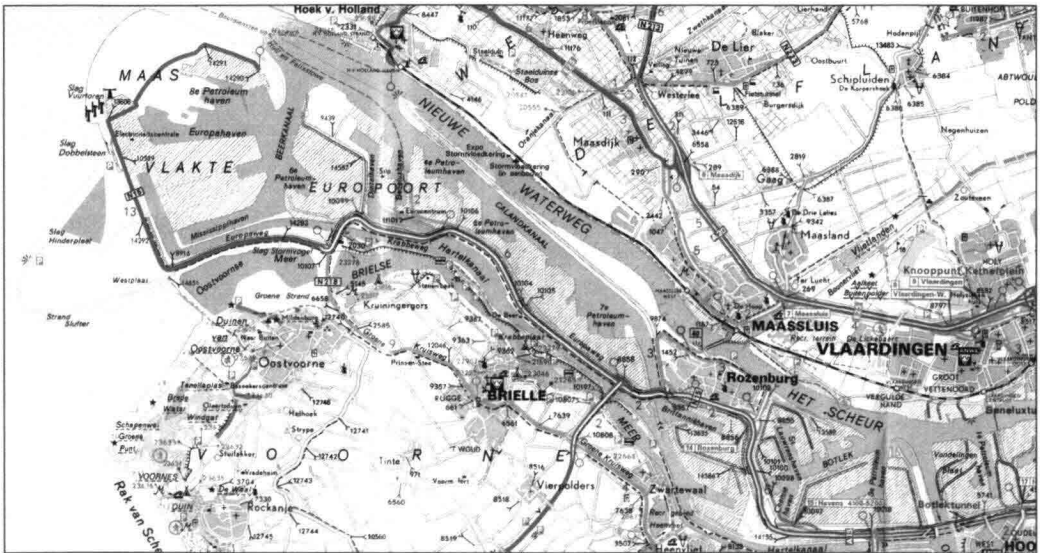


Het rijkswegenplan 1928.

regionaal georganiseerd en de rijksingenieurs moesten ook diensten verlenen aan de provinciale besturen.

Behalve bij het algemene toezicht op de waterstaatszorg, was de dienst vooral betrokken bij de kust- en oeververdediging, droogmakerijen en de verbetering van de grote rivieren. De bemoeienis van Koning Willem I met de waterstaat was nadrukkelijk. Grote projecten, zoals de aanleg van kanalen en de droogmaking van de Haarlemmermeer, werden op zijn initiatief ondernomen. De ontwerpen die werden gemaakt, waren vooral functioneel. Deze functionaliteit is duidelijk zichtbaar in de ruimtelijke inrichting van bijvoorbeeld de Haarlemmermeer. Zowel bij droogmakerijen als bij de regulering van de grote rivieren en de aanleg van kanalen moest rekening worden gehouden met de geomorfologie van het landschap. De begrenzing van de droogmakerijen en de situering van de boezem was afgestemd op de begrenzing van de oorspronkelijke meren. De tracering van kanalen was afgestemd op de hoogteligging van het landschap en het verloop van natuurlijke watergangen.

Vanuit functionele en kostenbesparende overwegingen is er sprake van inpassing in het



Kanalisisatie van de Maas: de Nieuwe Waterweg.

landschap. In de loop der tijd hebben de droogmakerijen en kanalen, door beplanting, de aanleg van wegen en de afstemming van nieuwe bebouwing op de aanwezigheid van de kanalen een structurerende invloed gehad op de inrichting van het landschap. Dit is duidelijk herkenbaar bij de plaatsen langs de Zuid-Willemsvaart.

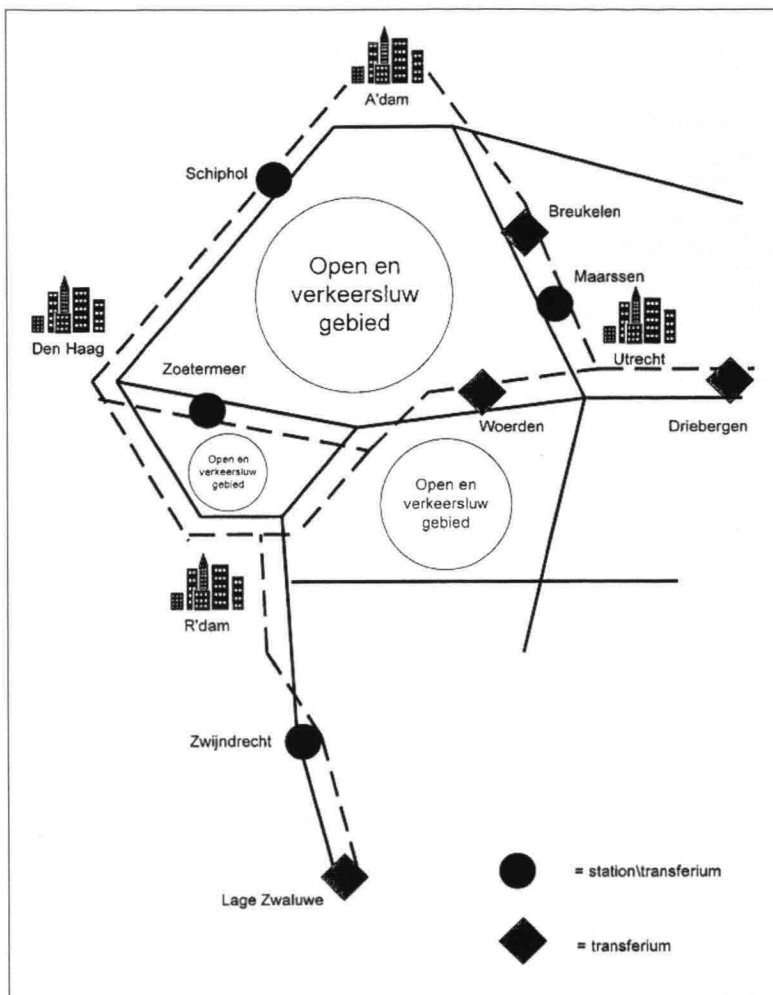
Zeer omvangrijke waterstaatswerken werden op basis van specifieke wetgeving tot stand gebracht: Haarlemmermeer (1839), afdamming Sloe (1815), kanalisatie van de Maas (1915), Zuiderzeewet (1918) en de Deltawerken (1958).

De waterstaatsingenieur als vormgever van de ruimte komt het duidelijkst tot uitdrukking bij de Zuiderzeewerken. De verkaveling, wegenstructuur, situering van de boerderijen en de ligging van de dorpen waren gebaseerd op hiërarchische functionaliteit, kenmerkend voor de ingenieursaanpak. Het toepassen van de vestigingsplaatstheorie van Cristaller voor de allocatie van de dorpen in de Noordoostpolder is hiervan een voorbeeld met blijvende historische waarde. Voor het stedenbouwkundig ontwerp van de dorpen werden architecten en stedenbouwkundigen ingeschakeld die een stringent functionele ontwerptheorie aanhingen. Deze vooruitstrevende aanpak sloot goed aan bij de mentaliteit van de waterstaatsingenieur en heeft geresulteerd in unieke voorbeelden van functionele stedenbouw met een historische waarde.

De ingenieur heeft tevens de basis gelegd voor het verankeren van de discipline civiele planologie binnen de huidige subfaculteit Civiele Techniek.

Ook een andere ontwikkeling bij de realisering van de Zuiderzeewerken is opmerkelijk. In eerste instantie werd de realisering van de Zuiderzeewerken ingegeven door de bescherming tegen de zee en de winning van landbouwgrond. Gedurende de realisering werden de doelstellingen verruimd met als gevolg ingrijpende wijzigingen in de ruimtelijke inrichting van de Zuiderzeewerken. Waterbeheer, recreatieve voorzieningen, stedelijke uitbreiding ten behoeve van de Randstad, alsmede landschapsbouw en natuurontwikkeling drukten in de loop der tijd mede een stempel op het ruimtelijk ontwerp voor het nieuw gewonnen land.

De Waterstaat heeft daarmee aangetoond in staat te zijn vorm te geven aan een anti-



Hoofdverkeersnet Randstad.

perend en adaptief ruimtelijk orderingsbeleid. Tevens werd de basis gelegd voor een multidisciplinaire aanpak van grootschalige projecten. Bij de realisering van de Deltawerken konden de vruchten hiervan worden geplukt, ondanks het feit dat de waterbouwkunde centraal stond. De Deltawerken zijn niet alleen waterbouwkundig maar ook vanuit een oogpunt van ruimtelijke inrichting uniek.

TOEKOMSTIGE UITDAGINGEN VOOR DE WATERSTAAT ALS VORMGEVER

Algemeen Het aandachtsgebied van de Waterstaat is ten opzichte van de historische waterstaatszorg en polderinrichting verruimd naar de wisselwerking tussen ruimtelijke ordening en infrastructuur, de inrichting van het rivierengebied en de vormgeving van vervoerscorridors. Ook voor het ontwerp van nieuwe wegen of de uitbouw hiervan wordt een andere werkwijze gehanteerd dan in het verleden. De analyse van milieueffecten, de economische kosten en baten, de consequenties voor de ruimtelijke ordening en de landschappelijke inpassing maken deel uit van het ontwerpproces. Het

belang van de rol van de waterstaatsingenieur als ruimtelijke vormgever van ons land is daarmee duidelijk toegenomen. Hieronder worden enige aandachtsgebieden belicht.

Wisselwerking verstedelijking en infrastructuur In het verleden was de bemoeienis van de Waterstaat met de verstedelijking van ons land beperkt. Het primaat hiervan lag nadrukkelijk bij het ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu. De Rijksplanologische Dienst leverde de vakinhoudelijke expertise. De Waterstaat was volgend in de planning van de infrastructuur van de wegen. Vanuit de zorg voor het handhaven van een goede bereikbaarheid van steden en economische centra, alsmede vanuit de zorg voor het beperken van de mobiliteit, richt de Waterstaat zich nadrukkelijker op de gewenste verstedelijking van ons land.

In concreto gaat het hierbij om de allocatie van toekomstige woongebieden, bedrijfsterreinen, kantorenlocaties, grootschalige detailhandel en recreatieve voorzieningen. Voor de Waterstaat is de selectie van nieuwe bouwlocaties c.q. uitbreiding van bestaande stedelijke gebieden, onder andere relevant vanuit de zorg voor bereikbaarheid, gegeneerde mobiliteit, keuze van vervoer, doelmatig gebruik bestaande infrastructuur en de exploitatie van vervoersdiensten. De verdere ontwikkeling van evaluatiemethoden en simulatiemodellen voor de allocatie van bouwlocaties en transportmodellen kan een bijdrage leveren aan het inzicht in de materie en een verantwoorde politieke keuze.

Binnen de faculteit wordt op dit terrein (toegepast) wetenschappelijk onderzoek verricht dat ten dele reeds in nauwe samenwerking met de Waterstaat plaatsvindt. In de opleiding zijn hiervoor nieuwe en aangepaste vakken opgenomen, die de civiel ingenieur met als afstudeerrichting infrastructuur, de vereiste basiskennis verschaft.

Inrichting rivierengebied Na de hoogwaterperiodes op de grote rivieren werd een omvangrijk programma uitgevoerd ter verbetering van de rivierdijken. Behalve op de problematiek van de dijkhoogtes richt de Waterstaat zich op de inrichting en het beheer van het stroomgebied van de grote rivieren. De aandacht concentreert zich daarbij vooral op de inrichting van het winterbed. Dit is bij uitstek een terrein waarbij de Waterstaat als vormgever en landinrichter een taak vervult. Behalve afvoer capaciteit van het winterbed is het behoud en de ontwikkeling van de natuurwetenschappelijke, landschappelijke en cultuurhistorische waarde van het rivierengebied relevant. Het vraagstuk vergt multidisciplinaire kennis, waarbij, rekening houdend met de primaire functie voor de waterafvoer, een integrale afweging van belangen plaatsvindt, resulterend in een ontwerp voor de inrichting en het toekomstige beheer. De traditionele waterstaatsingenieur zal daarbij meer de rol vervullen van regisseur dan van vakinhoudelijke deskundige op het gebied van watermanagement. Aanpak en werkwijze vergen kennis op het gebied van procesplanning, inspraak en besluitvorming.

Inrichting van vervoerscorridors De omvang van het verkeer is in de afgelopen decennia sterk gegroeid. Ook in de toekomst wordt een verdere groei verwacht. Met name de afwikkeling van het verkeer op het hoofdwegennet en de er naar toe leidende wegen is sterk gestegen. Ook bij het railvervoer kan worden geconstateerd dat het vervoer zich in toenemende mate concentreert op de hoofdverbindingen.

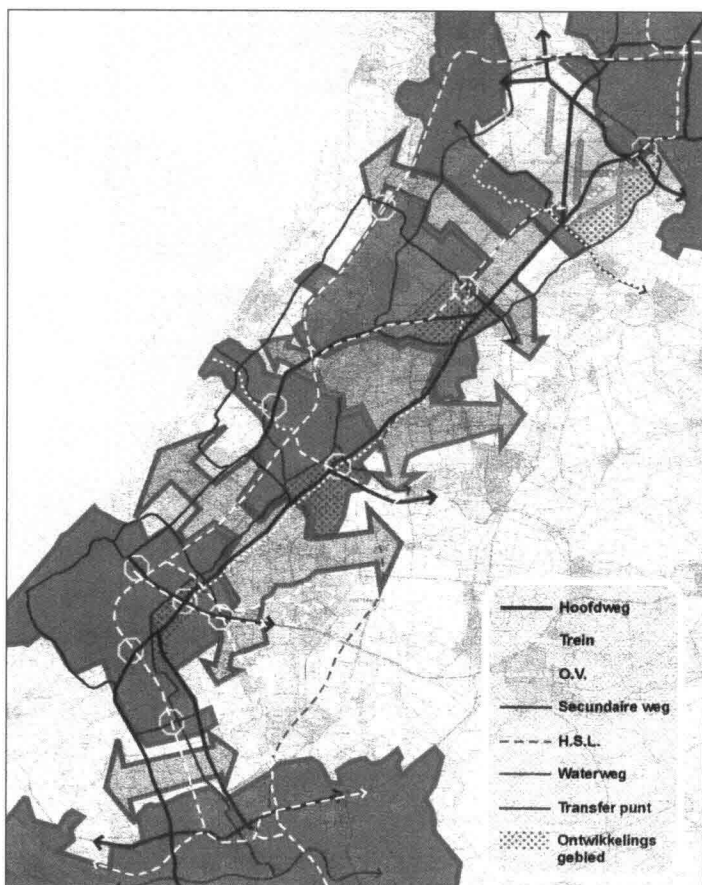
Om de afwikkeling van het verkeer op de belangrijkste verbindingen in de toekomst te kunnen garanderen, zijn omvangrijke investeringen noodzakelijk. Deze investeringen hebben betrekking op slechts een beperkt aantal nieuwe verbindingen. De investeringen zullen vooral worden aangewend in verruiming van de capaciteit door toevoeging van extra rijstroken, aanpassing van de fysieke geleiding (breien in plaats van weven) en elektronische verkeersgeleiding. Daarnaast zullen op de belangrijkste verbindingen, knooppunten en stedelijke tangenten [stadsring] stroken worden aangelegd om speci-

fieke doelgroepen te faciliteren. Ook het spoorwegennet wordt uitgebreid. Hierbij ligt het accent op baanverdubbeling, het opheffen van lokale knelpunten, de aanleg van de Betuwelijn en de noordelijke aftakking, de aanleg van de hoge snelheidslijn, alsmede verbeteringen in regeling.

De voorziene maatregelen hebben ingrijpende consequenties voor de vormgeving van de infrastructuur. Kunstwerken, verlichting, informatieportalen, fysieke scheiding van rijstroken, tunnels, noodzakelijke verschillen in hoogteligging en maatregelen om de geluidshinder te beperken, zullen de verschijningsvorm van de weginfrastructuur gaan bepalen. Daarnaast zullen de bestemmingen langs de wegen, zoals bedrijven, kantoren, detailhandel en horeca, het aanzicht sterker dan vroeger bepalen.

Selectie van vervoerscorridors in Nederland De aanwijzing, ontwikkeling en inrichting van vervoerscorridors beoogt een driedelig doel: (1) het handhaven van een goede bereikbaarheid van economische centra middels een doelmatige afwikkeling van vervoersstromen, (2) een ruimtelijke inrichting waarbinnen de kwaliteit van het leefmilieu zo hoog mogelijk blijft en (3) het creëren van de mogelijkheid de vervoerswijze te beïnvloeden.

Uitgaande van een ruimtelijk concept waarvan vervoerscorridors deel uitmaken, is de vaststelling van het netwerk van vervoerscorridors essentieel. Binnen dit netwerk vor-



Vervoerscorridors in Noord- en Zuid-Holland.

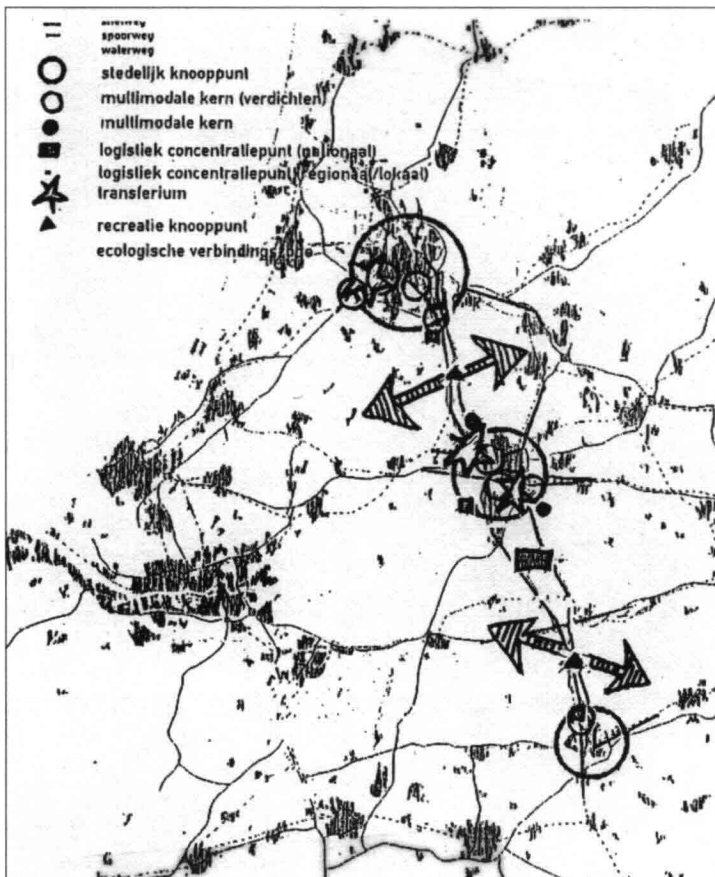
men de stedelijke concentraties de knopen en de corridors de verbindingen. De selectie van het netwerk is gebaseerd op de volgende criteria:

- aanwezigheid c.q. potentiële aanleg van een multimodale infrastructuur
- verbinding van stedelijke gebieden die binnen het netwerk de belangrijkste posities innemen voor wat betreft bereikbaarheid - de gebieden die doorsneden worden moeten voldoende woon- en bedrijfsbestemmingen bevatten, die als voeding voor de vervoerscorridor kunnen fungeren.

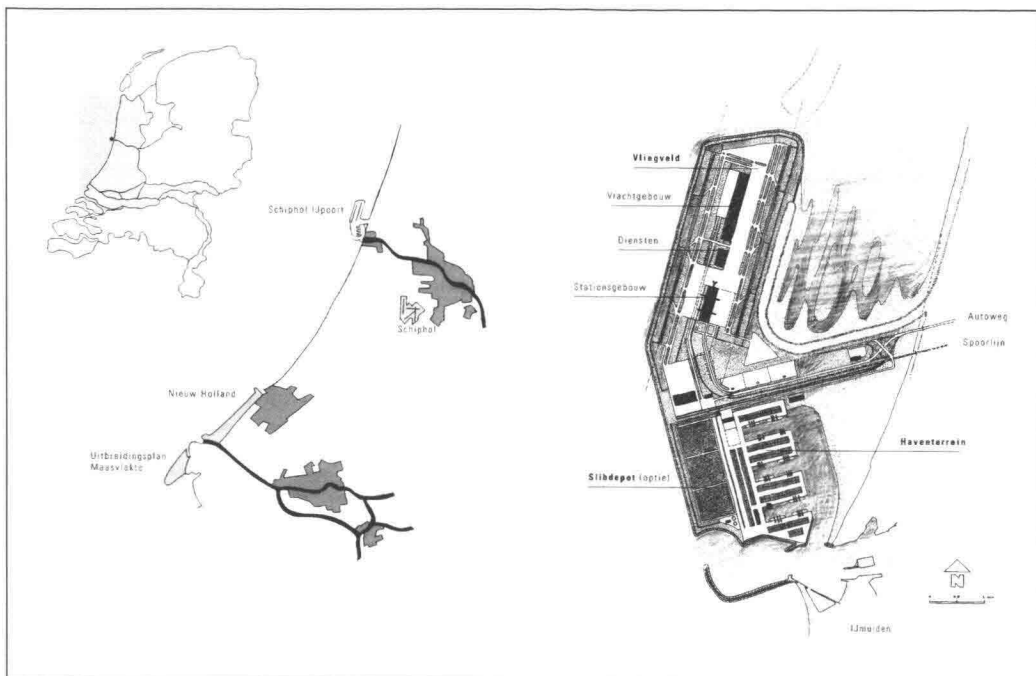
DE VERVOERSCORRIDOR ALS KRALENSNOER Bij de inrichting van vervoerscorridors dient onderscheid te worden gemaakt in:

- fysieke infrastructuur met bijbehorende voorzieningen voor de transportfunctie
- bedrijvenlocaties en voorzieningen met een hoog mobiliteitsprofiel
- voorzieningen en maatregelen voor een verantwoorde ruimtelijke inpassing
- woonlocaties met hoge dichtheden.

Behalve met het onderscheid in grondgebruik binnen een vervoerscorridor is het noodzakelijk rekening te houden met een integraal concept voor de inrichting van de corridor waarbinnen de economische activiteiten, de woonfuncties en het vervoerssysteem (bedrijfseconomisch) kunnen functioneren. Een dergelijk concept zou kunnen worden



Vervoerscorridor Amsterdam-Utrecht-Den Bosch.



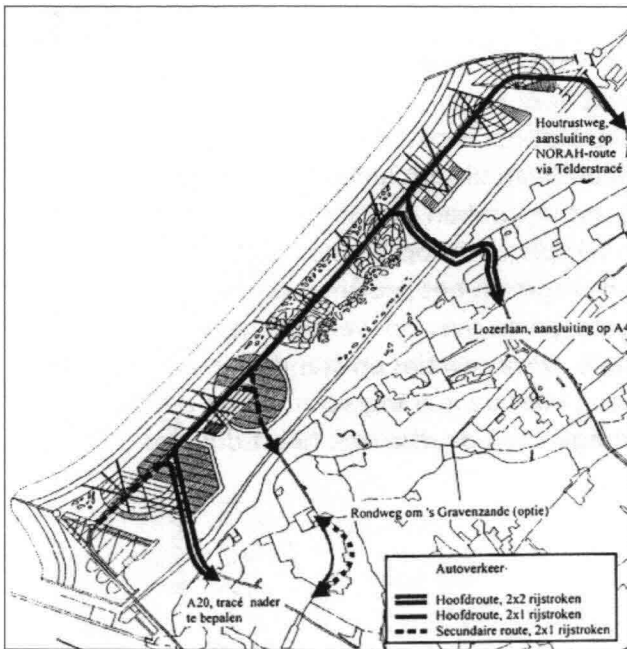
Schiphol IIpoort.

getypeerd als een kralensnoer. Het snoer bestaat uit de multimodale infrastructuur en de kralen worden gevormd door:

- de 'verknoping' tussen de infrastructuur in de vorm van verkeersknooppunten, stations en transferia
- bedrijfslocaties, multimodaal ontsloten door infrastructuur in de corridor
- woonlocaties eveneens multimodaal ontsloten door de infrastructuur in de corridor.

In veel gevallen zal een ruimtelijke concentratie van verschillende functies gewenst zijn. Dit hangt samen met het minimale economische draagvlak voor voorzieningen in de vorm van stations en transferia, alsmede met het beperken van de investeringskosten en exploitatielasten. Daarnaast is het gewenst het aantal halteplaatsen voor het openbaar vervoer in een corridor te beperken teneinde de reistijd kort te houden.

DE ZEE ALS BOUWLOCATIE In het verlengde van kustbescherming, landaanwinning en droogmakerijen ligt een taak voor de Waterstaat bij het benutten van de zee als bouwlocatie voor de hand. Dit sluit tevens aan op aanwezige kennis en de beheerstaak die de Waterstaat voor de Noordzee vervult. Bij het benutten van de zee als bouwlocatie kan onder andere worden gedacht aan uitbreiding van de Maasvlakte, de kustlocatie nabij Scheveningen en een eventuele tweede luchthaven of runway voor de kust. Behalve de kustwaterbouwkundige aspecten spelen ook de vormgeving, inrichting en noodzakelijke ontsluitende infrastructuur een rol. Naar verwachting zal de realisering van bouwlocaties voor de kust wijzigingen tot stand brengen in de kustmorfologie. Evenals bij de Deltawerken zullen mogelijkheden benut kunnen worden voor natuurbouw. Kustwaterbouw biedt mogelijkheden voor de compensatie van verloren gegaan



Landuitbreiding voor de kust van Zuid-Holland.

'natuurlijk' landschap. Het gebruik van natuurlijke bouwmaterialen als zand en grind prevaleert in dit verband boven de constructieve offshore-techniek.

AANPAK, ORGANISATIE EN SAMENWERKING In de komende decennia is er een omvangrijke taak in de uitbouw en aanpassing van de infrastructuur. De hoofdinfrastructuur ligt voor een belangrijk gedeelte binnen vervoerscorridors. De ruimtelijke vormgeving hiervan dient te worden beschouwd als een inrichtingsvraagstuk in plaats van een inpassingsvraagstuk. Dit betekent dat een organisatie de verantwoordelijkheid op zich neemt voor de planontwikkeling, de realisatie en het beheer van vervoerscorridors. Hiervoor komen twee instanties in aanmerking: de betrokken gemeenten en het rijk. Traditioneel behoort de afweging van bestemmingen en de ruimtelijke vormgeving tot de taak van gemeenten die dit vastleggen in bestemmingsplannen. De ontwikkelingen in de voorbije jaren hebben aangetoond dat dit leidt tot een grote verscheidenheid aan oplossingen. Het lijkt derhalve zinvol te komen tot een selectie van samenhangende vervoerscorridors, waarvan de planontwikkeling, de realisatie en het beheer berusten bij het rijk, in casu de Waterstaat. De onlosmakelijke samenhang met de aanpassing en de uitbouw van de infrastructuur is hiervoor mede bepalend.

Van multidisciplinaire organisatie naar multidisciplinaire samenwerking

De Waterstaat heeft zich in de loop van zijn bestaan ontwikkeld tot een multidisciplinaire organisatie, die in samenwerking met ingenieursbureaus en aannemers in staat is gebleken zeer grootschalige projecten, inclusief de ruimtelijke inpassing c.q. inrichting te kunnen realiseren.

Als evenwel de projecten in toenemende mate zijn gelegen binnen of aangrenzend aan het stedelijk gebied, lijkt een andere werkwijze voor de hand te liggen. Samenwerking met disciplines die niet direct tot de standaarduitrusting van de Waterstaat behoren, is

noodzakelijk. Daarnaast zal nauw moeten worden samengewerkt met betrokken bestuurlijke organen en belanghebbenden. Op projectniveau kan dit betekenen dat de Waterstaat participeert en/of leiding geeft aan projectteams die bemand zijn met 'derden'. Een ontwikkeling die zich soms reeds voordoet.

Gezien het voorgaande is het zaak dat de TU Delft in onderzoek en onderwijs aandacht blijft besteden aan inpassingsplanologie, ruimtelijke inrichting, effectanalyses, afwegingsmethodes voor ruimtelijke alternatieven, de organisatie van een multidisciplinair planproces en de risico-analyse voor grootschalige projecten.

Samenwerking tussen de Waterstaat en de TU Delft op dit vakgebied levert de beste garantie dat toekomstige waterstaatsingenieurs adequaat zijn voorbereid op de uitdagingen die hen wachten.

REFERENTIES

- Bovy, P. en F.M. Sanders: Een ruimtelijk concept voor toekomstig vervoersmanagement; Stedebouw en Volkshuisvesting, 97/3
- Cannen, H. van der en F.M. Sanders: Programma voor de Randstad Metropool; Metropolitan Debat 96/97
- Herder, W. den en F.M. Sanders: De corridor als kralensnoer; Stedebouw en Volkshuisvesting, 97/3
- Sanders, F.M.: Infrastructuur en verstedelijking; een verkenning naar de toekomstige ruimtelijke hoofdstructuur in Nederland, 1996
- Raad voor de Ruimtelijke Ordening: Wisselwerking tussen verstedelijking en infrastructuur, 1996
- Sanders, F.M.: Vervoerscorridors als een ordenend principe voor ruimtelijke inrichting; Cement 1997/7-8
- Willems, J.: Bundeling van infrastructuur, conceptvorming en ontwerpstructuur, TRAIL-Congres 1995
- Ven, G.P. van de: Leefbaar Laagland, Geschiedenis van de waterbeheersing en landaanwinning in Nederland, Utrecht, 1993
- INRO-TNO, Mobiliteitseffecten Ruimtelijke Perspectieven, Delft, 1997
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat: Visie op verstedelijking en mobiliteit; bouwsteen voor de actualisering van het ruimtelijk beleid, Den Haag, 1995
- Verroen, E.J.: De zoektocht naar mobiliteitsbeperkende verstedelijkingsvormen, Rooilijn, jrg. 28, nr. 8, 1995b

DE TERUGKEER VAN DE
STEDENBOUWKUNDIGE
DISCIPLINE

**Verstedelijking van de infrastructuur
als ontwerp-opgave**

6 V.J. Meyer

• • •

Grootschalige infrastructuur werden eeuwen achtereen ontworpen als onderdeel van het stedelijk weefsel. In de loop van de twintigste eeuw raakt dit aspect van de stedenbouwkundige discipline versnipperd. De inrichting van de infrastructuur en het openbaar gebied werd overgelaten aan deelspecialisten en vele uiteenlopende belanghebbende instanties. Maar integrale stedenbouwkundige ontwerpen worden herontdekt. In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe de 'absentie' kon ontstaan en waarom grootschalige infrastructuur weer dienen aan te sluiten op stedelijke netwerken. Ook worden de eisen genoemd die de verstedelijking van de infrastructuur stelt aan het stedenbouwkundig vakmanschap en worden hoopvolle voorbeelden gegeven van de hervonden samenhang tussen stad en infrastructuur.

• • •

Kenmerkend voor de twintigste eeuw in stedenbouwkundig opzicht is een problematische positie van grootschalige infrastructurele netwerken (autowegen, spoorwegen, havens, luchthavens) ten opzichte van stedelijke nederzettingen. Grote infrastructuur worden overwegend opgevat als een paradoxale combinatie van ballast en noodzaak: ze worden beschouwd als barrières, ze produceren overlast en tegelijk kan de stad niet zonder.

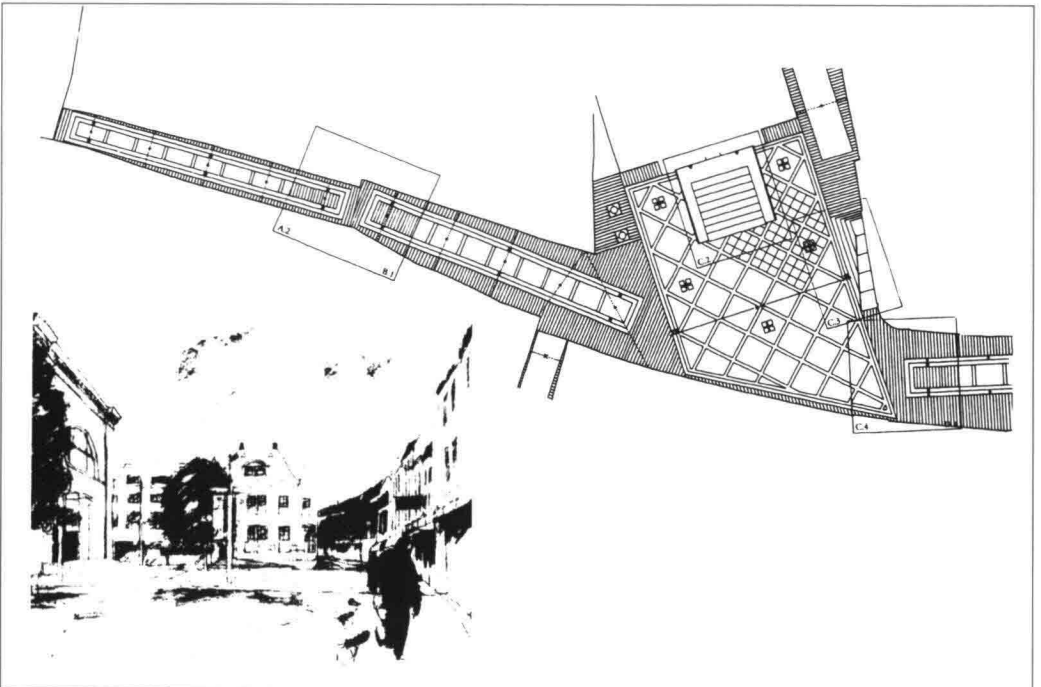
Dat is wel eens anders geweest. In voorgaande eeuwen en zelfs tot ver in de twintigste eeuw werden grootschalige infrastructuur ontworpen als onderdeel van het stedelijk weefsel, en hadden ze meerdere gebruiksmogelijkheden en meerdere betekenissen. In de loop van deze eeuw is echter op dit gebied een leemte ontstaan in de stedenbouwkundige discipline, zowel in theoretisch, conceptueel als technisch opzicht. Lange tijd is zowel het ontwerp van de infrastructuur als het ontwerp van de openbare ruimte overgelaten aan specialisten op het gebied van de disciplines, zoals verkeerskundigen en groenontwerpers, terwijl ook andere belanghebbende instanties, zoals waterschappen, spoorwegmaatschappijen, energiebedrijven en de verkeerspolitie claims legden op

de inrichting van de infrastructuur en het openbaar gebied. Nu het belang van een integrale benadering van het openbaar gebied als stedenbouwkundige ontwerpogave langzamerhand weer is 'herontdekt', wreekt zich de langdurige 'absentie' van de stedenbouwkundige discipline op dit gebied en de versnippering van complexe infrastructuur-vraagstukken over vele verschillende deeldisciplines.

Waar sprake is van complexe confrontaties tussen grootschalige infrastructurele systemen en stedelijke nederzettingen, is het de opgave deze confrontaties met integrale stedenbouwkundige ontwerpen aan te pakken, teneinde de infrastructuur méér te laten zijn, meer betekenis en gebruiksmogelijkheden te geven dan alleen die van infrastructuur. Deze aanpak zou men de 'verstedelijking van de infrastructuur' kunnen noemen. Deze verstedelijking van de infrastructuur kan als volgt als stedenbouwkundige ontwerpogave worden geformuleerd: 'Ontwerp de grootschalige infrastructuur zodanig, dat er plaatselijk een situatie kan ontstaan die de functie van de infrastructuur zelf intact laat en tegelijk een meerwaarde oplevert voor de directe stedelijke context.'

ARGUMENTEN Er zijn verschillende redenen om grootschalige infrastructuur aan deze opgave te onderwerpen.

1. Openbaarheid van de openbare ruimte De eerste reden is van principiële aard: de openbare toegankelijkheid van netwerken die van structurele betekenis zijn voor het stedelijk leven, is een basisvoorwaarde voor een democratisch functionerende maatschappij, waarin vrijheid en politieke gelijkheid centrale begrippen zijn. Juist aan die netwerken, waarmee de grootste publieke investeringen zijn gemoeid, kan de eis gesteld worden dat ze te allen tijde voor iedereen vrij toegankelijk zijn, dat ze voor verschillende soorten gebruik geschikt zijn en verschillende betekenissen toegekend krij-



Nieuwe inrichting van de Kerkstraat en het Kerkplein in Den Bosch



Prins Clausplein, Leidschendam; een knooppunt van infrastructuur.

gen. Het is een conditie om de wereld 'vanuit zoveel mogelijk verschillende perspectieven te kunnen zien'.¹

2. Conditie voor stedelijke vitaliteit De tweede reden is het uitgangspunt dat de ruimtelijke vorm van de openbare ruimte als een conditie kan functioneren voor de ontwikkeling van maatschappelijke dynamiek, die tot uiting komt in de ontwikkeling van diverse stedelijke activiteiten en programma's. Die maatschappelijke dynamiek is van tevoren nooit geheel 'maakbaar', verloopt zelden precies volgens een vastgesteld plan, maar is grotendeels nog onbekend. Dit hoeft niet als bedreigend en subversief te worden beschouwd, maar het is juist een wezenlijk kenmerk van maatschappelijke vitaliteit. Een goede openbare ruimte, die langere tijd 'meegaat', kan in de loop der tijd meerdere functies en betekenissen krijgen. Hierbij kunnen de functies die primair de aanleiding vormden voor de aanleg van de openbare ruimte, na verloop van tijd weer verdwijnen.

3. Duurzaamheid Hiermee komt men bij een derde uitgangspunt, namelijk de duurzaamheid van de openbare ruimte en van grootschalige infrastructuren. Die duurzaamheid heeft een financieel-pragmatische en een culturele kant. De financieel-pragmatische kant is het feit dat met de aanleg van grootschalige openbare netwerken nu eenmaal grote publieke investeringen zijn gemoed, waarvan het zonde is als die na verloop van tijd nutteloos zouden worden. De culturele kant is de noodzaak van een historische gelaagdheid en complexiteit in de stedelijke structuur, als basis van een rijk en veelzijdig stedelijk leven.



Gravure van waterstad Vlissingen eind 17e eeuw.

4. Efficiënt grondgebruik De meest voor de hand liggende reden, zeker in een dichtbevolkt land als Nederland, is nog niet eens genoemd: het efficiënt en spaarzaam omgaan met de beschikbare ruimte. Grootschalige infrastructuur wordt vaak gekenmerkt door een zeer extensief ruimtebeslag. Zo worden delen van het snelwegennetwerk, havens en luchthavens, zeker in de nabijheid van stedelijke gebieden, omzoomd met brede 'bufferzones', waardoor het feitelijke ruimtebeslag veel groter is dan dat van de infrastructuur zelf. Naarmate er steeds meer grootschalige infrastructuur wordt aangelegd, wordt dit aspect van inefficiënt grondgebruik steeds problematischer. De voorgaande vier argumenten hebben de laatste decennia nauwelijks enige rol van betekenis gespeeld bij de planvorming en het ontwerp van infrastructuur. Integendeel, er is een breed gedragen vooronderstelling ontstaan dat grootschalige infrastructuur en bestaande stedelijke milieus per definitie strijdig met elkaar zijn. Het zonder meer handhaven van die vooronderstelling wordt steeds moeilijker, nu er tal van grote infrastructuurprojecten op stapel staan.

**INTEGRATIE VAN CIVIELTECHNISCHE EN STEDENBOUWKUNDIGE OPGAVE:
DE TRADITIE VAN DE 19DE EN BEGIN 20STE EEUW.** In de Hollandse watersteden is al een eeuwenoude traditie opgebouwd op het gebied van de integratie van civieltechnische en stedenbouwkundige opgave. De aansluiting van stratennetwerk op waterwegennetwerk ging in de Hollandse watersteden niet probleemloos en was alleen mogelijk met een uitgekiend systeem van waterhuishouding en beveiligingssysteem tegen hoge waterstanden. De morfologie en typologie van stedelijke ruimten van de Hollandse waterstad werden daarmee voor een belangrijk deel bepaald door het complexe civieltechnische bouwwerk van kaden, dijken, sluisen en bruggen. Essentieel voor deze aansluiting was ook de ruimtelijke inrichting van de havenkade.

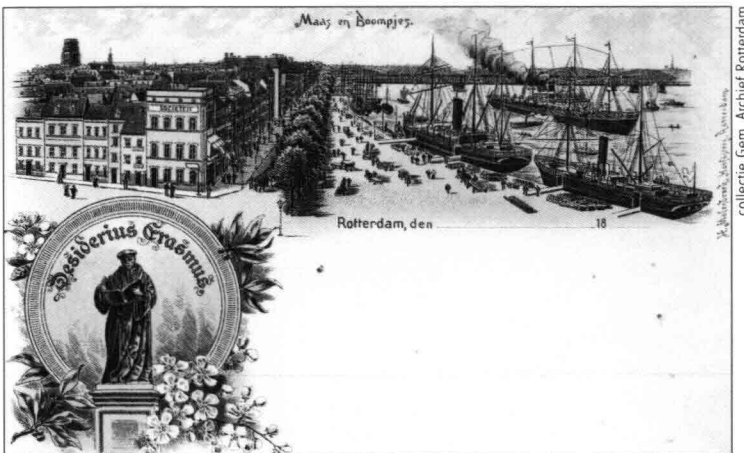
De inrichting was in de meeste Hollandse steden vaak even eenvoudig als doeltreffend: een rij bomen markeerde het onderscheid tussen het deel van de kade dat als laad- en los-zone voor de scheepvaart gebruikt kon worden, en het deel dat als openbare straat was bestemd. De havenkade was een **intermediair** systeem, dat twee verschillende netwerken die op twee extreem verschillende schaalniveaus functioneerden, namelijk internationale en lokale netwerken, met elkaar vervocht.

Met de opkomst van de nieuwe handelseconomie en de nieuwe transporttechnologie in de 19de eeuw kreeg de relatie tussen grootschalige, internationale verkeersinfrastructuur en het stedelijk netwerk een andere vorm en schaal. De aanleg van grootschalige havengebieden in de 19de eeuw vertegenwoordigde op extreme wijze de verandering van de stad van een gesloten naar een modern open systeem.

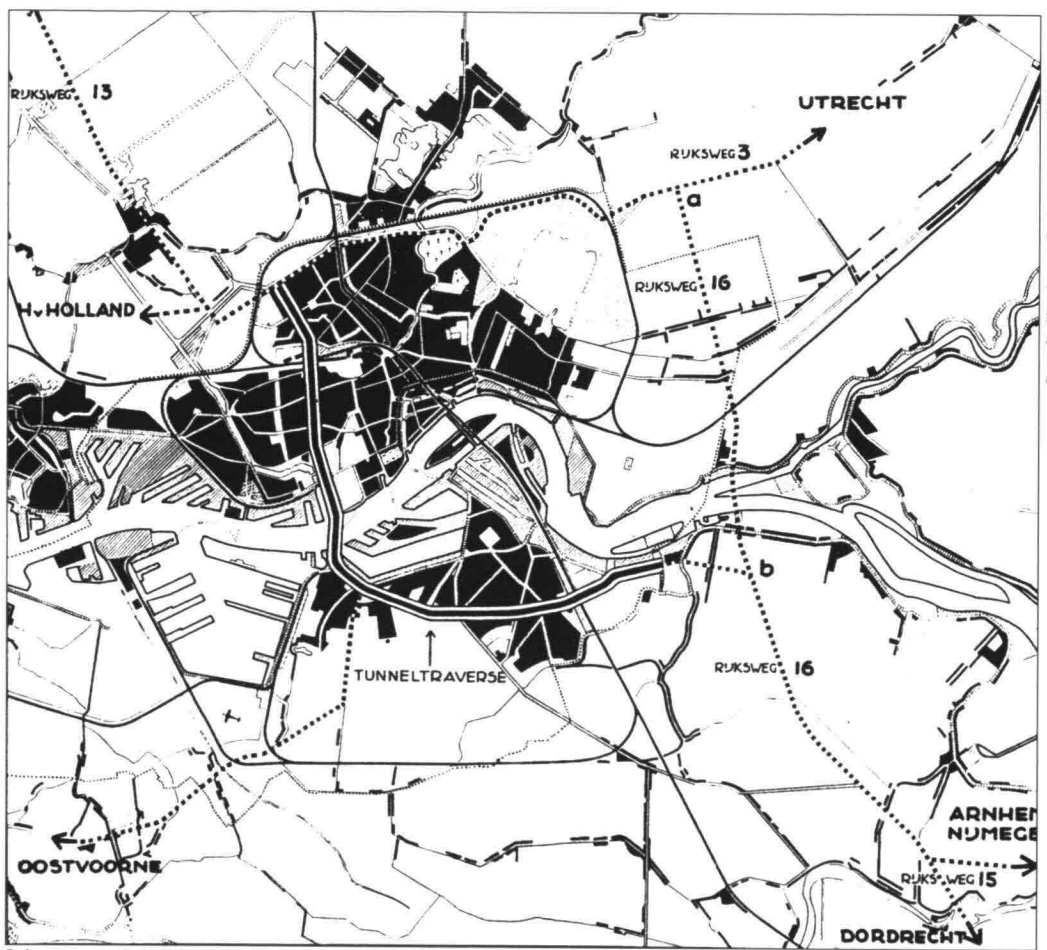
Veelal betrof het gebieden die voor de 19de eeuw het territorium van vestingwerken vormden, die de stad moesten **afschermen** van de dreiging van de buitenwereld. In de 19de eeuw werden ze getransformeerd tot het territorium van moderne transportcommodaties, die de stad juist moesten **openen** voor de buitenwereld.

Aanvankelijk, eind 19de en begin 20ste eeuw, werd deze vervochting uitdrukkelijk vormgegeven in de nieuwe stedenbouwkundige plannen van die periode. De ontwikkeling van de havenstad Rotterdam in die periode is een mooi voorbeeld. Een belangrijk uitgangspunt bij de stedenbouwkundige planvorming in die periode was dat de nieuwe openbare ruimte meerdere soorten gebruik mogelijk moest maken. De ontwerpen waren gebaseerd op een vermoeden dat de haven en de gehele transporteconomie sterk zouden groeien en een groot beslag zouden leggen op het gebruik van de openbare ruimte. Maar hoe sterk ze precies zouden groeien en hoeveel beslag gelegd zou worden op de openbare ruimte was volstrekt onzeker.

De stratenstelsels van de Rotterdamse stadsarchitecten Rose en De Jongh waren zo ontworpen dat ze in de eerste plaats ruimte boden aan de nieuwe utilitaire functies van de havenstad, maar tegelijk ook voor andere doeleinden konden worden gebruikt. De nieuwe door Rose geprojecteerde singels dienden in eerste instantie voor de waterhuishouding van de stad, maar tegelijk dienden zij als nieuwe vestigingsplaats voor de welgestelde burgerij en als wandelpromenade voor de stadsbevolking. De singels en lanen die De Jongh later ontwierp, waren bedoeld voor het weg- en railtransport van en naar



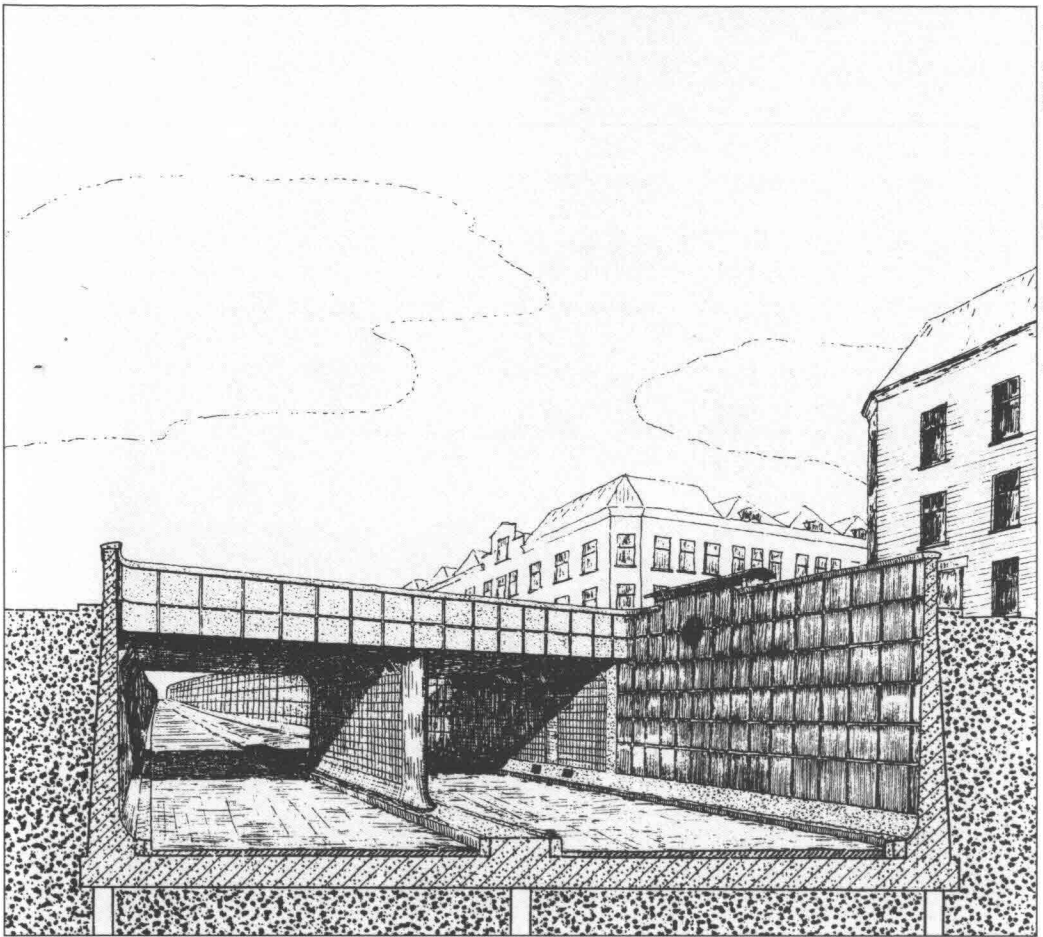
Gravure van waterstad Rotterdam eind 19de eeuw.



Schema van de wegen bij Rotterdam met tunneltraverse.

de haven. Maar ook deze singels en lanen werden zodanig ontworpen dat ze tegelijk als kernen van een geheel nieuw stadsdeel konden functioneren, waar de voorname burgerij zich kon vestigen. Ook bij het ontwerp van de eerste interlokale autowegverbinding dwars door de stad Rotterdam werden dezelfde principes gehanteerd. De Maastunneltraverse werd in de jaren dertig ontworpen onder leiding van stadsarchitect W.G. Witteveen als onderdeel van het rijkswegennet zonder het stedelijk netwerk te verstoren. Hier werd een systeem toegepast van primaire en secundaire wegen, die deels op hetzelfde niveau en deels op verschillende niveaus zijn aangelegd. Het gehele tracé is als één samenhangend ontwerp uitgevoerd, waarbij maatvoering, materiaalgebruik en beplanting het tracé een stedelijk karakter verlenen.

Bij deze voorbeelden is een aantal principes van belang voor het ontwerp. Ten eerste: de betreffende infrastructurele elementen (de havenkade, het ontwatersysteem, de autoweg) werden steeds beschouwd als deel van het gehele stedelijk systeem van openbare ruimten. Het waren openbare werken weliswaar van een nieuwe orde en schaal dan tot dusver gebruikelijk was, maar de opgave was juist het nieuwe en grootschalige te combineren mét en aan te laten sluiten óp het traditionele en bestaande netwerk van openbare ruimten. Dit principe is goed af te lezen uit de ont-



Bron: De Maastunnel, 2e jaargang, nov. 1938, Rotterdam

Onderdoorgang, Nieuwe Binnenweg.

werptekeningen en plankaarten zelf, waarop te zien is dat de nieuwe openbare werken veelal een nieuwe structurerende rol vervullen in het grotere geheel van openbare ruimten. Ze werden zodanig ontworpen dat een nieuwe logica, een nieuwe leesbaarheid in het stedelijk netwerk ontstond.

Ten tweede: er is steeds sprake van een **schaaldifferentiatie** bij deze nieuwe openbare werken, waardoor ze een rol vervullen als deel zowel van grootschalige netwerken als van het stedelijk lokale netwerk. Veelal is deze schaaldifferentiatie afleesbaar in het profiel. Soms met subtiele en relatief eenvoudige middelen, zoals de bomerrij aan de havenkade een onderscheid aanbrengt tussen havenzone en stadszone. Soms met ingrijpendere middelen, zoals een verdiepte rijweg in de Maastunneltraverse.

Ten derde: om te zorgen dat, ondanks de schaaldifferentiatie, de nieuwe openbare werken als samenhangende stedelijke ruimten konden worden vormgegeven, was er sprake van één stedenbouwkundig **auteurschap**. De aansluiting van het project op verschillende netwerken, de profilering, materialisering, beplanting en technische constructie werden alle in één samenhangend ontwerp geïntegreerd. De bomerrij aan de havenkade zorgde enerzijds voor ruimtelijke geleiding en differentiatie in gebruik, anderzijds zorgde zij juist voor een samenhangend beeld van de havenkade. De ontwerper kon deze bomerrij echter alleen ontwerpen in samenhang met het ontwerp voor de con-

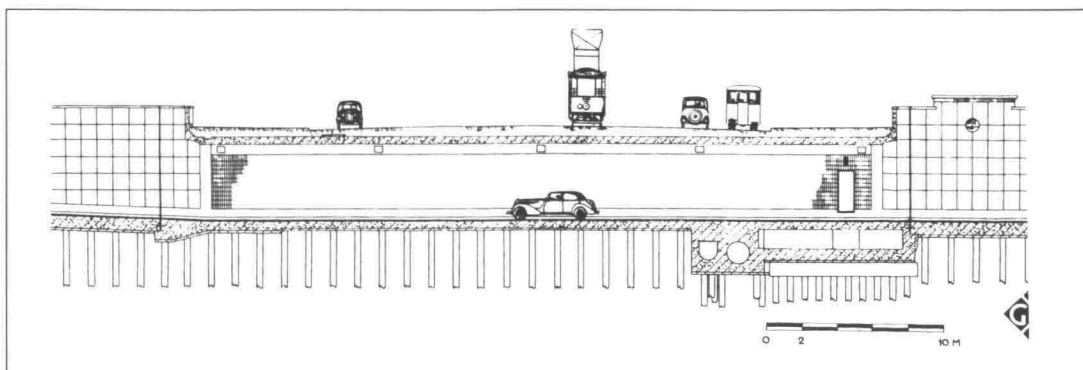
structie van de havenkade zelf, dat een complex systeem van trekstangen en rijsmatten betrof. De inpassing van de kaden, watersystemen of verdiepte autowegen in stedelijke profielen was mogelijk dankzij een nauwe samenhang tussen civiele techniek en stedenbouwkundig ontwerp. Stedenbouwkundig en civieltechnisch ontwerp waren onverbreekbaar met elkaar verbonden.

Ten vierde: de primaire functie van de openbare werken overheerste niet in het ontwerp; men zou dit een 'defunctionalisering' van het stedenbouwkundig ontwerp kunnen noemen. De vormgeving van de nieuwe openbare werken was niet een directe afgeleide van de primaire functies die de aanleiding vormden voor de aanleg ervan: de singels waren niet puur als waterverversingssystemen of als snelverkeerroutes vormgegeven, de kaden waren niet puur als laad- en loszones vormgegeven. Secundaire motieven speelden een hoofdrol in de vormgeving, waardoor een combinatie van functies van het openbaar gebied mogelijk werd gemaakt, maar bovendien konden ze een rijkere betekenis ontwikkelen in het alledaagse openbare leven van de stad.

Verschillende openbare ruimten: gesocialiseerde en getechnocratiseerde openbare ruimte Terwijl de stedenbouwkundige planvorming in de negentiende en begin twintigste eeuw nog sterk werd beheerst door een strikt onderscheid tussen openbaar en privaat domein, en door het streven de openbare ruimte op meerdere schaalniveaus tegelijk af te stemmen, is in de loop van de twintigste eeuw het onderscheid tussen openbaar en privé op de achtergrond geraakt en is een scheiding ontstaan tussen openbare ruimten op verschillende schaalniveaus.

In de na-oorlogse decennia is op grote schaal gepoogd het beeld van de stad te transformeren tot datgene wat de 'Moderne Beweging' voor ogen stond. Enerzijds werd de aandacht gericht op de nieuwe woonwijken die gemodelleerd moesten worden volgens de collectivistische idealen. Anderzijds werden grote infrastructurele projecten ontwikkeld, die niet alleen dienden voor ontsluiting van de nieuwe steden en wijken, maar vooral ook voor de transformatie van de bestaande steden.

Zo nauwkeurig en minutieus als de stedenbouwkundige vakwereld zich in Nederland met de vormgeving van de nieuwe woonwijken bezighield, zo globaal en afstandelijk werden de nieuwe verkeersdoorbraken gepland. Ten aanzien van dit laatste beperkten de stedenbouwkundigen zich tot de grote lijnen; de uitwerking was voor rekening van de Diensten der Publieke Werken. De consequenties voor de samenhang van de stadsplattegrond (of liever het verdwijnen van die samenhang) werden nauwelijks interessant gevonden, omdat die stadsplattegrond op den duur geacht werd plaats te maken voor een stad naar geheel moderne snit.



Onderdoorgang Mathenesserlaan, langsdoorsnede.



Foto Piet Rook, Vlaardingen

Rotterdam, Maasboulevard.

De scheiding enerzijds tussen het domein van de woonwijk en dat van de grootschalige infrastructuur werd versterkt door een verzelfstandiging en institutionalisering van overheidsbureaucratieën die zich specialiseerden in het ontwerp en de uitvoering van grootschalige infrastructuren (Rijkswaterstaat, gemeentelijke verkeersdiensten). Maar anderzijds ook door het verdwijnen van de inzet bij de stedenbouwkundige discipline zelf om zich actief te bemoeien met het ontwerp van die infrastructuur.

Een van de meest dramatische voorbeelden van deze scheiding wordt gevormd door de Bijlmermeer, waarvan het ontwerp in de jaren zestig bedoeld was als een hoogtepunt van de moderne stedenbouw. Hier werd tot in het extreme een scheiding doorgevoerd van enerzijds een sociaal domein, bestaande uit de combinatie van woningbouw met het voor voetgangers en fietsers bestemde maaiveld, en anderzijds de verkeersinfrastructuur, die als een autonoom stelsel in de ontsluiting van de woongebouwen voorziet. Zo nauwgezet als de stedenbouwkundigen zich destijds bezighielden met de vormgeving van het sociale domein, zo afzijdig hielden ze zich van de nadere uitwerking van de verkeersinfrastructuur, die als een wezensvreemd element boven de groene wereld van het maaiveld zweeft. Aldus was een bijna volledige scheiding ontstaan tussen een 'gesocialiseerd openbaar domein', dat tot het werkgebied van de stedenbouw werd gerekend, en een 'getechnocratiseerd openbaar domein' van de verkeersinfrastructuur, waar de stedenbouwkundige zich verre van hield.

Juist deze autonomie van de verkeersinfrastructuur is de laatste jaren als een van de wezenlijke fouten van de stedenbouwkundige opzet van de Bijlmermeer onderkend.²

HERDEFINIËRING VAN HET PUBLIEK DOEIN In de jaren tachtig is staatszorg voor de volkshuisvesting in het kader van een socialisatieproces een achterhaald doel geworden. De uitgebreide bemoeienis van de overheid met het sociale domein is in de



Het havenfront van Barcelona.

loop van de jaren tachtig steeds meer beschouwd als een ongewenste vorm van bureaucratische bemoeienis en betutteling van het alledaagse leven en voorwerp van brede kritiek geworden. Het afscheid van de socialisatie heeft geresulteerd in een situatie waarin 'het publieke' onderwerp van spraakverwarring en meningsverschillen is geworden. Deze ontwikkeling vindt niet alleen plaats op het terrein van de stedenbouw en ruimtelijke ordening, maar betreft alle facetten van het maatschappelijk leven die tot dusver als een openbare zaak werden beschouwd.³

De vraag is wat dit voor het publieke domein betekent, en voor de stedenbouwkundige concepten voor de vormgeving van het publieke domein. Sinds de jaren tachtig is sprake van een heropleving van de belangstelling voor de vormgeving van het openbaar gebied als stedenbouwkundige opgave. Van groot belang zijn de experimenten die tot doel hebben nieuwe concepten op het gebied van de relatie tussen grootschalige infrastructuur en lokale netwerken van openbaar gebied te realiseren. Dit zijn experimenten waarbij nieuwe relaties tussen stad en infrastructuur als een **stedenbouwkundige** opgave worden geformuleerd. De nieuwe benadering van infrastructurele elementen als dijken, weteringen, kanalen en havens is kenmerkend voor de vernieuwing van de stedenbouwkundige aanpak. Het zijn elementen die niet alleen de plattegrond van de stad structureren, maar vaak ook dominerend zijn in het stadsbeeld, vanwege het ruimtelijk, driedimensionale karakter van deze elementen: als verhogingen van het grondvlak (dijken) of als uitsneden uit het grondvlak (havens, kanalen). Zeer pregnante is de betekenis voor het stadsbeeld van grote waterkeringsprojecten, zoals de Maasboulevard in Rotterdam en de zeeboulevard in Vlissingen. In beide gevallen is die betekenis voor het stadsbeeld als een positieve stedenbouwkundige kwaliteit beschouwd en nader uitgewerkt in de wijze van materialisering en beplanting. Ook bij havens en kanalen is sprake van een herwaardering van deze elementen voor

het stadsbeeld: hoewel ze altijd primair ontworpen worden om utilitaire redenen (overslag, transport), wordt ook de betekenis voor het stadsbeeld de laatste tijd weer meer betrokken bij het ontwerp. Handhaving van oude havens en kanalen, ook als ze hun primaire functies hebben verloren, kan zinvol zijn om redenen van historische continuïteit van karakteristieke en dominante elementen van het stadsbeeld.

Bij de aanleg van nieuwe dijken en havens lijkt een inpassing in het stadslandschap steeds moeilijker te worden vanwege de voortschrijdende schaalvergroting. Toch tonen recente ontwikkelingen met betrekking tot de verzwarende van de rivierdijken dat schaalvergroting niet hoeft te betekenen dat er geen inventieve ontwerp oplossingen meer mogelijk zijn.

De activiteiten van de 'Technische Commissie voor de Waterkeringen', maar ook van een particulier initiatief als 'Waterwerk' van de Stichting Fort Asperen spelen hierin een belangrijke rol. Een belangrijk voorbeeld uit het buitenland, waarbij aan de orde wordt gesteld dat een stedelijke ringweg kan worden ontworpen in combinatie met specifieke plekken die een bijzondere betekenis hebben voor de stad, is het havenfront van Barcelona.

Het belang van dit ontwerp is niet alleen gelegen in de combinatie van verschillende netwerken, maar ook in het ruimtelijk effect van de bewerking van het grondvlak, waardoor een essentieel aspect aan het stadsbeeld werd toegevoegd. Dit aspect moet los worden gezien van de louter functionele reden.

Langs het oude havenfront van Barcelona werd begin jaren tachtig het tracé van de nieuwe ringweg aangelegd. Hier is gebruik gemaakt van het reeds aanwezige hoogteverschil in de situatie. Dit hoogteverschil was tot het eind van de 19de eeuw een van de karakteristieke kenmerken van het stadsbeeld van Barcelona. De stad was als het ware op een 'plint' aan de haven gelegen. Door de aanleg van nieuwe kaden in de 20ste eeuw, werd het abrupte hoogteverschil vervangen door flauw aflopende hellingen, waardoor nauwelijks meer zichtbaar was dat de stad zo hoog boven het zeewaterniveau ligt. Met het nieuwe ontwerp voor de Moll de la Fusta wordt het hoogteverschil opnieuw benadrukt: de stad ligt weer op een 'plint'. Hierdoor werd tegelijk een heldere differentiatie in het profiel mogelijk, waardoor snelweg en stedelijk balkon aan de haven in één ontwerp konden worden geïntegreerd. Deze recente voorbeelden van relaties tussen stad en infrastructuur als stedenbouwkundige opgave berusten alle op dezelfde principes als de eerder beschreven voorbeelden uit de 19de en begin 20ste eeuw:

- a) de infrastructuur wordt als **essentieel deel van het openbaar domein** beschouwd en behandeld
- b) door **schaaldifferentiatie** kunnen ook grootschalige infrastructuren worden gecombineerd met lokale netwerken in een integraal ontwerp
- c) het onderwerpen van belangrijke delen van de infrastructuur aan één ontwerper: het zogenaamde **auteurschap**
- d) de **defunctionalisering** van het stedenbouwkundig ontwerp, dat wil zeggen dat de primaire functie niet de primaire leidraad is in het ontwerp. Via deze principes is het mogelijk weer te komen tot een **verstedelijking van de infrastructuur**.

DE ACTUELE OPGAVE: HET ONTWIKKELEN VAN STEDENBOUWKUNDIG VAKMANSCHAP

Welke eisen stelt de opgave van de nieuwe aansluitingen tussen grootschalige infrastructuur en stedelijke netwerken aan het stedenbouwkundig vakmanschap?

Ten eerste vereist het voldoende technisch vakmanschap: om stedenbouwkundige constructies van de openbare ruimte te kunnen ontwerpen die deze nieuwe aansluitingen

kunnen vormgeven, en om regels voor de bebouwing te kunnen stellen zodat de bebouwing bijdraagt aan het bedoelde karakter van de aansluiting. Het vereist de kennis en vaardigheid om nieuwe vormen voor een meervoudig te gebruiken openbare ruimte te kunnen ontwerpen en aan te passen aan de specifieke eigenaardigheden van het grondgebied. Het ontwerp van nieuwe intermediaire openbare ruimten vereist ook in vergaande mate een integratie van verschillende ontwerpende disciplines: in plaats van het huidige proces van een nieuwe verzelfstandiging van verkeersontwerp, civiele techniek, landschapsarchitectuur is een sterke integratie van deze disciplines in het stedenbouwkundig ontwerp noodzakelijk. Voor de huidige situatie betekent dit vooral een herstel van kennis van en inzicht in de civiele techniek, die de laatste decennia vrijwel uit de opleiding van stedenbouwkundigen is verdwenen.

Ten tweede vereist de opgave van de nieuwe aansluitingen tussen netwerken en fragmenten een flinke mate van cultureel besef en inzicht, om met het ontwerp te kunnen anticiperen op specifieke culturele condities van de betreffende stad, en om in staat te zijn de verschijningsvormen en betekenissen van het openbaar, sociaal en private domein in een bepaalde situatie te herkennen en te bewerken.

'De' culturele kwaliteit bestaat niet, en zeker niet van de openbare ruimte, die immers een ruimte is die open staat voor vele verschillende groepen gebruikers, die elk hun eigen culturele waarden en veronderstellingen hebben. Voor de ontwerper is het de kunst deze openbare ruimte zodanig te ontwerpen dat er verschillende vormen van gebruik en verschillende interpretaties van de culturele kwaliteit van deze openbare ruimte mogelijk worden gemaakt.

NOTEN

- 1 De essentie van openbaarheid, als een onvermijdelijke aspect van de moderne maatschappij, is in de tweede helft van de 20ste eeuw opnieuw onderwerp van debat geworden, onder andere gestimuleerd door Amerikaanse auteurs als Hannah Arendt, Marshall Berman en Richard Sennett. De filosofe Hannah Arendt heeft in de jaren '50 de toon gezet voor een debat over de noodzaak van openbaarheid als grondslag voor een open, democratische samenleving, en die tegelijk de noodzaak van het leren omgaan met openbaarheid inhoudt. Voor Arendt is de essentie van het openbaar domein dat het de mogelijkheid biedt van zoveel mogelijk verschillende ervaringen en de wereld vanuit zoveel mogelijk perspectieven te kunnen zien. Het voortbestaan van het openbare domein als zodanig veronderstelt dat de burgers die zich in dit domein bewegen, voortdurend open staan voor nieuwe ervaringen en indrukken en in beginsel niemand uitsluiten van toegang tot en gebruik van het openbaar domein. Hannah Arendt, 'The Human Condition', Chicago/Londen, 1958, pag. 57-58. Marshall Berman, 'All that is solid melts into air', New York/Londen 1983. Richard Sennett, 'The Conscience of the Eye. The design and social life of cities', New York 1991.
- 2 Zie: ARCHIS 3/97, themanummer Bijlmermeer, Rotterdam maart 1997; Han Meyer, Jenneke ter Horst, Arno de Vries, 'Sleutelen aan de Bijlmer', Delft 1991.
- 3 De veranderende opvattingen over de verhouding tussen het publieke en het private domein betreffen ook het onderwijs en de kunstensector (verstrengeling met het bedrijfsleven door sponsoring, een toenemende druk om 'marktgericht' te denken en handelen), de gezondheidszorg (afbouw en privatisering van diverse sociale verzekeringen), politiek en justitie en het mediabeleid.
- 4 De heftige maatschappelijke discussies in de jaren tachtig tussen voor- en tegenstanders van dijkverzwaringen hebben ertoe geleid dat door de regering een commissie werd ingesteld onder voorzitterschap van oud-minister Boertien. Naar aanleiding van de aanbevelingen van deze commissie heeft de regering de Technische Adviescommissie Waterkeringen van Rijkswaterstaat in 1993 opgedragen een ontwerpinstrumentarium voor dijkbeheerders (de waterschappen) te ontwerpen. Dit heeft geleid tot de uitgave een vijftal 'handreikingen' voor het ontwerp van nieuwe dijktracés: een voor constructief ontwerpen, een voor ruimtelijk ontwerpen, een voor de waardering van landschaps-, natuur- en cultuur-aspecten, een voor de beleidsanalyse en een voor de visie-ontwikkeling. Gepoogd is om maatschappelijke en culturele aspecten te integreren met technische, constructieve aspecten. 'Waterwerk' is de naam van een tentoonstelling (met bijbehorende catalogus) van de Stichting Fort Asperen in 1995, naar aanleiding van de overstromingen in Limburg, Brabant en Overijssel als gevolg van de hoge waterstanden in de rivieren in de winter van 1994-1995. Gevreesd werd dat door deze overstromingen de voorstanders van cultuur- en natuurverniegende dijkverzwaringen weer aan invloed zouden winnen. Met de studieopdrachten voor dijkverzwaringen aan acht ontwerpers wilde de Stichting Fort Asperen laten zien dat er tal van andere mogelijkheden voor waterkeringen zijn. Zie: Technische Adviescommissie Waterkeringen, 'Handreikingen', Delft april 1994; Stichting Fort Asperen, 'Waterwerk'-Visies op steden aan de rivier', Acquoy / Zwolle 1995.

Met de Afsluitdijk werd het aantal kilometers kust dat moest worden beschermd teruggebracht van 550 tot 52 kilometer.



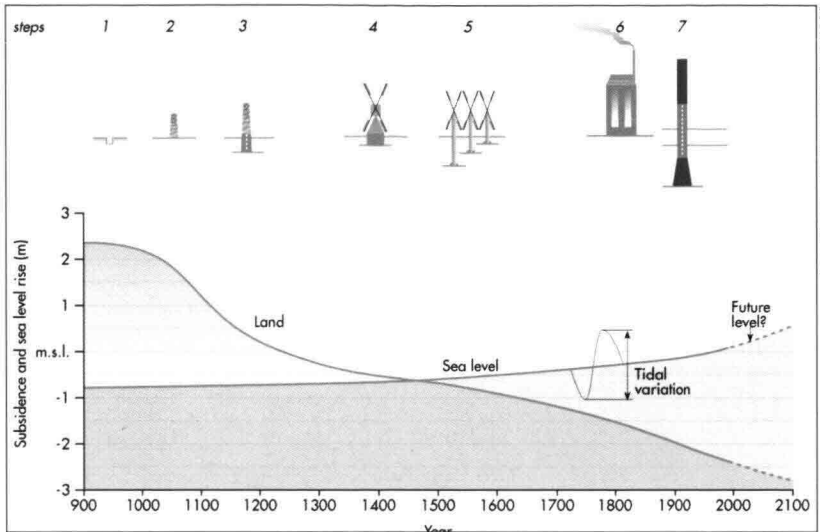
De Cruquius maakte samen met twee andere gemalen vanaf 1848 in drie jaar tijd de Haarlemmermeer droog.

GREPPELS, SLOTEN EN DIJKEN: STURING VAN DE RUIMTELIJKE INRICHTING OP LOKALE SCHAAL

De bewoners van laag Nederland vestigden zich aanvankelijk op natuurlijke verhogingen in de omgeving van rivieren en de zee. De vestigingsplaatsen zijn nog in plaatsnamen terug te vinden: Raamsdonk, Nederhorst den Berg en Hillegersberg. De bewoners in deze streken voedden zich hoofdzakelijk met opbrengsten van jacht en visserij. Incidenteel vond ook landbouw op de klei- en veenpakketten plaats. In Groningen en Friesland leefden de bewoners op terpen - woonheuvels die door huisafval, dierlijke mest en opbrengen van klei steeds verder boven de bedreigende hoogwaterstanden kwamen te liggen.

Rond het jaar 1000 neemt door nog onbekende oorzaak de bevolking in West-Europa toe. Het betekende dat er meer monden moesten worden gevuld. De bewoners in het westen van Nederland begonnen de klei- en veengebieden achter de duinen systematisch te ontginnen en geschikt te maken voor de akkerbouw. In het veengebied, dat toentertijd enkele meters boven gemiddeld zeeniveau lag, begonnen de bewoners greppels en afwateringssloten te graven om de grondwaterstand te verlagen, dé voorwaarde om granen te produceren.

Dit ontginningsproces begon vanuit de stroompjes, die de klei- en veengebieden door-



FIGUUR 1: Het zakken van het land en het stijgen van de zeespiegel noodzaakt tot steeds grootschaliger ingrijpen.

smeden. Het ontginningspatroon is in de huidige verkavelingsstructuur van vele oude polders nog herkenbaar. Deze ogenschijnlijk kleine ingrepen in de natuurlijke gang van zaken vormen echter het begin van een onafwendbare ontwikkeling, fase 1 van figuur 1. Door het dalen van de grondwaterstand verloren de sponsachtige klei- en veenpakketten water. Inklinking van de klei en oxydatie van het veen waren het gevolg en daarmee daling van het land. De daling van het landoppervlak verminderde de opbrengst uit de landbouw. Dit was aanleiding om de greppels en afwateringssloten verder uit te diepen teneinde de grondwaterstand voldoende te kunnen verlagen voor de landbouw. Dit leidde wederom tot oxydatie van het veen en klink van veen- en kleilagen.



Bron: Waterstaatswerken verkend, Den Haag, 1993

De watersnoodramp van 1916 rondom het IJsselmeer richtte aanzienlijke schade aan in Marken.

Reeds in de 11de eeuw was het landoppervlak aan de randen van de veengebieden zover ten opzichte van het zeeniveau gedaald, dat bij hoogwater het land onderliep. De landbouw werd bemoeilijkt en de gewassen gingen verloren. Vandaar dat de bewoners hun have en goed begonnen te beschermen door het opwerpen van kaden en dijken, fase 2 van figuur 1. De dijken gaven bescherming tegen hoge waterstanden van buiten. In Nederland valt meer neerslag dan er verdampt, vooral in de winter. Om hoge waterstanden achter de dijken te vermijden, werden de dijken voorzien van afsluitbare afwateringsmiddelen. Het overtollige water werd bij lage buitenwaterstanden geloosd. Vanwege de hogere ligging ten opzichte van het land kregen de dijken ook spoedig een rol in het wegverkeer.

De ontginning vond niet alleen plaats in de gebieden langs de Noordzee, maar ook in het gebied van Rijn en Maas met zijn vertakkingen. Tot 1200 zochten de bewoners van het rivierengebied de hoogste oeverwallen en de donken op om veilig te zijn voor hoge rivierstanden. Ook hier ontstond vraag naar landbouwproducten. De geleidelijke bedijking van het rivierengebied vond plaats van west naar oost. De dijken verhinderden de toevoer van riviersediment naar de gebieden erachter. Grote hoeveelheden sediment werden nu tussen de dijken afgezet; de uiterwaarden slibden op.

De ontwatering en afwatering van de klei- en veenpakketten achter de dijken veroorzaakten bodemdaling. De afwatering stagneerde, omdat bij hoge rivierstanden het overtollige water niet kon afstromen. Vandaar dat in de winter grote delen van het rivierengebied blank stonden. De hooggelegen bandijk bood dan bescherming voor lijf, have en goed. In het rivierengebied hebben de dorpen zich dan ook langs de dijk ontwikkeld, binnen het bedijkte gebied kwam nauwelijks bewoning voor. De dijken vormden ook de enige verbinding voor het landverkeer.

OPSCHALING EN DETAILLERING VAN DE REGIONALE RUIMTE DOOR DAMMEN EN POLDERS

Door het steeds groter wordende ontginningsareaal en verder verlagen van de grondwaterstand, nam het inklinkende landoppervlak steeds verder toe. In de 13de eeuw was de omvang van het inklinkende oppervlak zo groot geworden, dat de te beschermen gebieden tot grotere eenheden moesten worden samengevoegd. Verder was de techniek van het dijkenbouwen zover ontwikkeld dat de veenstroompjes, die de veengebieden doorsneden, konden worden afgedamd. In de dam werd een uitwateringslus gebouwd om bij lage buitenwaterstanden te kunnen spuien om zodoende de grondwaterstand voldoende laag te houden, fase 3 van figuur 1.

De dammen verbonden ook de wegenstelsels aan weerszijden van de veenrivier. De verkeersactiviteiten zorgden ervoor dat rond de dam vaak nederzettingen ontstonden. Vele plaatsen eindigend op dam, herinneren aan de waterstaatkundige ingreep. Bijvoorbeeld rond de afdamming van de Rotte circa 1250 en de dam in de Amstel in 1275 ontstonden de steden Rotterdam en Amsterdam.

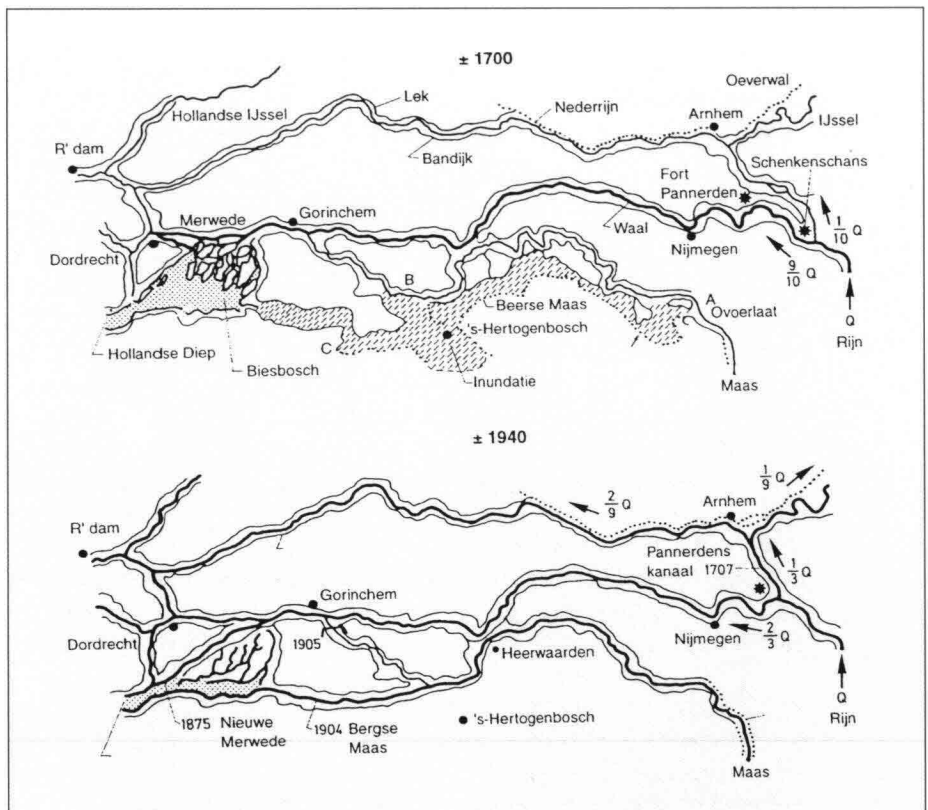
Bij het realiseren van de afdamming, het beheer en onderhoud van de waterkeringen en de sluis in de dam werden vele lokale gemeenschappen betrokken. Kon in het verleden de lokale samenleving nog toezien op beheer en onderhoud, de beheersobjecten hadden nu een zo'n grote omvang gekregen dat dit niet meer doenlijk was. De lokale gemeenschappen begonnen vertegenwoordigers af te vaardigen naar vergaderingen, waar de zorg voor dijken, dam en sluis werden besproken en besluiten over hun beheer en onderhoud werden genomen. Daarmee ontstonden, **bottom-up**, organisaties die zich om extentiële waarden bekommerden. Het streekwaterschap, vaak onder de benaming hoogheemraadschap, kwam in beeld.

Het essentiële kenmerk van deze organisatievorm is de eenheid van belang, betaling en zeggenschap. Belanghebbenden bij de beveiliging tegen hoge buitenwaterstanden

en een goede regeling van het water binnen het omdijkte gebied, betaalden bijdragen naar rato van hun profijt (uitgedrukt in landoppervlak). Zij kregen overeenkomstig dezelfde verhouding zeggenschap in de gezamenlijke belangenbehartiging. Door zijn bottom-up ontstaan en vertegenwoordigend karakter wordt het waterschap als de oudste vorm van democratie in dit land beschouwd. De waterschappen werden ook spoedig door de landsheren erkend. Hetgeen blijkt uit het Charter van 1255, dat de graaf van Holland aan het Hoogheemraadschap van Rijnland verleende.

De landsheren waren zeer genegen de waterschappen autoriteit toe te kennen. Deze bestuurslichamen waren immers zelfverzorgend door hun belastingstelsel. Bestuursvorm en kenmerk met betrekking tot het regionale waterbeheer hebben zich tot heden in ons staatsbestel gehandhaafd.

Thans zijn het niet meer de grootgrondbezitters die de vertegenwoordiging in het waterschap bepalen. Behalve het profijtbeginsel wordt nu ook het spiegelbeeld hiervan toegepast: de vervuiler betaalt. De huidige vertegenwoordigers worden gekozen uit de belanghebbende categorieën van eigenaars en gebruikers van gebouwde en ongebouwde onroerende zaken. Dus uit ingezetenen, land- en huiseigenaars, pachters van land, communale en industriële vervuilers. Afhankelijk van de zwaarte van het afzonderlijk belang van elke categorie in het totaal worden zetels per categorie toegekend. De staten van de provincie(s) waarin het waterschap ligt, stellen de zetelverdeling vast. Door de bodemdaling ging land verloren. Ook door andere oorzaken werd veel land aan het water prijsgegeven. In het zuidwesten werden de dalende veengebieden met zout water van zee doordrenkt. Het zoute veen werd weggegraven en diende als grondstof



Het verleggen van de waterlopen rond 1700 en 1940.

voor de zoutwinning, de selnering. In Midden-Nederland werd veen afgegraven of weggebaggerd om als brandstof, turf, te worden gebruikt. Het resultaat waren uitgestrekte watervlakten, die zich onder invloed van de wind vaak nog verder uitbreidden. Ook deze vorm van menselijk ingrijpen heeft grote invloed gehad op de structuur van het landschap.

De klink van de bodem door het voortdurend verlagen van de grondwaterstand was niet tegen te houden. In de 15de eeuw was het land achter de dijken en dammen zover gezakt dat het nauwelijks meer boven gemiddeld zeeniveau uitkwam. De ontwatering en afwatering van het zakkende land ondervonden steeds meer hinder van hogere buitenwaterstanden. Om het land geschikt voor de landbouw te houden, begon men de zee- en rivierkerende dijken gebieden te omkaden en hun afwatering onafhankelijk van de waterstand in de afgedamde veenstroom te maken.

Uit de omkade gebieden, polres of polders geheten, werd het water kunstmatig verwijderd en op de afgedamde veenstroom gebracht. De afgedamde, voormalige veenstromen, zoals Amstel, Rotte, Schie en Zaan, fungeerden en fungeren nog steeds als tussentijdse berging. Uit deze berging wordt het overtollige water bij lage zee- en rivierstanden geloosd. Deze trapsgewijze afvoer van het water wordt wel het polder-boezem-systeem genoemd. Dit systeem is in de laaggelegen delen langs de Noordzee, in Nederland zowel als Vlaanderen, gebruikelijk geworden.

De eerste constructies voor de kunstmatige afwatering waren met de hand bediende schroeven van Archimedes, hoesschoppen en door paarden aangedreven tredmolens. In de 15de eeuw komen windmolens in zwang. Juist de toepassing van de windmolen met draaibare kap is van grote betekenis geweest voor het voortbestaan van het westelijk deel van de Nederlanden, fase 4 van figuur 1.

LAND UIT WATER, MEER RUIMTE Behalve bescherming van het bestaande land tegen het oprukkende water, kwam ook landaanwinning voor. In het noorden en zuidwesten van ons land werden door de zee grote hoeveelheden slib afgezet. Als de gorzen en slikken boven hoogwater uit kwamen, werden zij bedijkt. Ontwatering en afwatering bij lage buitenwaterstanden waren dan verzekerd. De bedijkingen geven structuur aan het landschap en vormen de landverbindingen tussen de steden en dorpen.

De komst van de windmolen luidde een verder offensief tegen het water in. In de 16de eeuw was de bemalingstechniek zover ontwikkeld dat men het aandurfde ondiepe meren en plassen droog te leggen. Rondom de gehele plas werd een kanaal gegraven (ringvaart). Met de verwijderde grond werden terweerszijden dijken aangelegd. Vervolgens werd het water uit de plas door molens op de ringvaart gebracht. De eerste droogmakerij was het Achtermeer bij Alkmaar (1533). De omvang van deze droogmakerij was beperkt (35 ha).

Ontstonden de eerste droogmakerijen uit kleine ondiepe plassen en meren, in de 17de eeuw werden zij allengs groter. De eerste grote droogmakerij, de Beemster met zijn 7100 ha, kwam in 1612 tot stand. In 1622, 1626, 1630 en 1635 volgden respectievelijk de Purmer met 2756 ha, de Wijde Wormer met 1620 ha, de Heerhugowaard met 3500 ha en de Schermer met 4770 ha. Vooral de bevolkingstoename van Amsterdam en de daarmee gepaard gaande vraag naar voedsel hebben in belangrijke mate bijgedragen tot het vergroten van het landbouwareaal in Noord-Holland.

Sinds de 15de eeuw zijn grote watervlakten in Holland en Flevoland drooggelegd, vaak tot meer dan 6 meter onder gemiddeld zeeniveau. Aangezien de molens het water slechts 1,5 à 2,0 meter om hoog kunnen brengen, werden de molens in serie geschakeld om de opvoerhoogte te vergroten, fase 5 van figuur 1. De ruimtelijke structuur in het westen van Nederland is in belangrijke mate bepaald door de droogmakerijen. De

Door hun hogere ligging ten opzichte van het land kregen dijken spoedig een rol in het wegverkeer.



Foto: Meetkundige Dienst Rijkswaterstaat, Delft

Hoog water in de jaren '90 op het wegdek.

structuur van en het bodemgebruik in de droogmakerijen is ook weer bepaald door de ontwaterings- en afwateringseisen. Water bepaalt de structuur en inrichting en is derhalve het ordenend principe van de ruimte in het westen en noorden van ons land. De uitvinding van de stoommachine in de vorige eeuw betekende ook in het waterbeheer een verruiming van de mogelijkheden. Niet alleen grote polders konden worden drooggelegd, zoals het 18000 ha grote Haarlemmermeer, maar gehele boezemstelsels konden worden bemalen. Dit werd rond de eeuwwisseling ook nodig, omdat door de verbeterde ontwatering en afwatering in de polders ook de capaciteit van de boezem moest toenemen. In plaats van grotere peilvariatie met alle gevolgen van dien (verhoging boezemkaden) danwel vergroting van het oppervlak van de boezem (meestal niet voorhanden), kon door de inzet van stoom- en later elektrische gemalen de lozingscapaciteit op kunstmatige wijze worden opgevoerd, fase 6 in figuur 1.

GROOTSCHALIGE WERKEN ZORGEN VOOR STRUCTUREN OP NATIONAAL NIVEAU In de 18de eeuw kwamen vele overstromingen in het rivierengebied voor. Dit vond zijn oorzaak in de geringe capaciteit van het laag- en hoogwaterbed van Rijn en Maas om het oppervlaktewater en het ijs veilig naar zee af te voeren. De rivieren met hun vertakte geulenstelsel en eilanden in het laagwaterbed alsmede de ongelijkmatige vorm van het hoogwaterbed vormden belemmeringen voor een snelle afvoer van water en ijs. Ook de scheepvaart ondervond moeilijkheden door de slechte toestand van de rivieren. Onder de Republiek der zeven Verenigde Nederlanden (1581 - 1795) werd weinig aan verbetering gedaan. Dat veranderde tijdens de Bataafse Republiek, toen een centraal bestuursapparaat zich ging bezighouden met de bovengewestelijke waterstaatszorg van de zeearmen en de grote rivieren: de Rijkswaterstaat.

Rijkswaterstaat begon grootschalige rivierwerken uit te voeren. Rivierlopen werden verlegd of kregen een kortere loop naar zee om hoog opperwater en ijs sneller af te kunnen voeren. Ook voor de scheepvaart kwamen goede verbindingen tot stand. Rotterdam kreeg door de Nieuwe Waterweg een aanzienlijk kortere route naar zee. Het Noorzeekanaal en het Amsterdam-Rijnkanaal gaven Amsterdam uitstekende scheepvaartverbindingen met de zee en het achterland. Beide kanalen zijn ook van nationale betekenis voor de afvoer van water. Het Amsterdam-Rijnkanaal heeft ook een bovenregionale functie in de watervoorziening tijdens droge perioden.

Door de voortdurende verlaging van het waterpeil in de polders, door de klink van de bodem en het stijgen van de zeespiegel, is bijna tweederde van ons land kwetsbaar voor overstromingen. Daardoor moeten de waterkeringen periodiek op hun waterkerend vermogen worden gecheckt en waar nodig aangepast. Versterking van dijken bleef dikwijls achterwege. Een overstromingsramp vormde dan de aanleiding om de nodige maatregelen te treffen. Maatregelen die vaak in één klap de situatie aanmerkelijk verbeterden. Dat is in deze eeuw ook tweemaal geschied: het afsluiten van de Zuiderzee en estuaria, de 7de en laatste fase uit figuur 1.

Na decennia van discussies gaf de watersnoodramp van 1916 het laatste zetje om de Zuiderzee af te sluiten. De afsluiting van deze binnenzee stoelde op drie argumenten. Bescherming tegen stormvloed, bestrijding van de verzilting en verbetering van de zoetwaterhuishouding in de noordelijke provincies en landaanwinning om de toenevende bevolking met gewassen van eigen bodem te kunnen voeden. Door de Afsluitdijk werd het aantal kilometers kust dat tegen hoge stormvloedstanden moest worden beschermd, teruggebracht van circa 350 tot 32 km.

In het IJsselmeer kwamen nieuwe polders van ongekende afmetingen. Kortom, door de Zuiderzeewerken werd de ruimtelijke structuur van Nederland op nationale schaal gewijzigd. Er kwam zelfs een twaalfde provincie bij. De verbindingen tussen Noord-Nederland en de Randstad werden in tijd en afstand aanzienlijk bekort.

De stormramp van 1953, die in het zuidwesten zijn verwoestende sporen naliet, gaf de stoot tot het afsluiten van de estuaria in de Delta. Behalve als beveiliging tegen stormvloed werden voor de uitvoering van het Deltaplan nog twee argumenten aangevoerd, verbetering van de waterhuishouding en het ontsluiten van Zuidwest-Nederland door de aanleg van wegen over de dammen.

Tweemaal is het oorspronkelijke Deltaplan gewijzigd. Door het besluit om de Oosterschelde met een beweegbare waterkering af te sluiten, moesten secundaire dammen worden aangelegd om Antwerpen de beloofde getijloze scheepvaartverbinding met de Rijn te geven. In de jaren tachtig bleken de reeds versterkte dijken in het benedenriviereengebied te laag. Opnieuw werd het Deltaplan aangepast. Bij hoge stormvloedstanden zal ook de Nieuwe Waterweg met een beweegbare kering worden afgesloten. Om Europort beter voor de binnenscheepvaart te ontsluiten, is een derde beweegbare kering in het Hartelkanaal gebouwd. Met de Deltakeringen wordt nu slechts 50 kilometer waterkering aan de hoogste stormvloedstanden blootgesteld. In 1953 was dit nog 700 kilometer.

Om het noorden van ons land in droge perioden van meer water vanuit het IJsselmeer te kunnen voorzien, werd rond 1950 besloten tot kanalisatie van de Nederrijn en de Lek. Door het afsluiten van het Volkerak en het Haringvliet in het kader van het Deltaplan was ook minder zoetwater in West-Nederland nodig voor de verziltingsbestrijding. Door de kanalisatie van de Nederrijn-Lek worden de grote watersystemen van noordelijk deltabekken en het IJsselmeer aan elkaar gekoppeld. Met de stuw te Driel een tiental kilometers benedenstrooms van het splitsingspunt van Nederrijn en IJssel



Foto: Meekundige Dienst Rijkswaterstaat, Delft

De Ooipolder. Hoog water in de Waal in 1993.

wordt water via de laatst genoemde Rijnarm naar het IJsselmeer gevoerd. De stuw van Driel is de kraan waarmee het waterbeheer op nationaal niveau wordt gestuurd.

TENSLOTTE Duidelijk geworden is dat water de ruimtelijke structuur en inrichting van ons land in hoge mate heeft bepaald en nóg bepaalt. Water als ordenend principe is door planologen herontdekt. Een recente publicatie van de Rijksplanologische Dienst heeft de veelzeggende titel 'Ruimtelijke ordening op waterbasis' gekregen.

REFERENTIES

- De Romeinen tussen Rijn en Maas, T. Bechert, ISBN 90 6707 002 5
- Leefbaar laagland, G.P. van de Ven, ISBN 90 5345 031 9

DYNAMISCHE

BUFFERS

IN AUTOSNELWEGEN

**'Bypasses' maken congestie beheers-
baar door sterk verkorte verkeersfiles**

 D. Westland
P.H.L. Bovy

• • •

Steeds vaker veroorzaken files ook nog eens hun eigen files. Deze secundaire congestie ontstaat als een file zo lang is dat zij terugslaat op een bovenstrooms wegvak. De automobilisten passeren het fileveroorzakende knelpunt niet eens, maar lijden net zo goed aanzienlijke reistijdverliezen. Een veelbelovende oplossing voor secundaire files is de buffer. Een buffer is een plaatselijke verbreding van de bestaande rijbaan, stroomopwaarts van een knelpunt, met één rijstrook of meer, tijdelijk of permanent. Studies van de TU Delft wijzen uit dat de dynamische buffer 'uitermate zinvol', want filebekortend is.

• • •

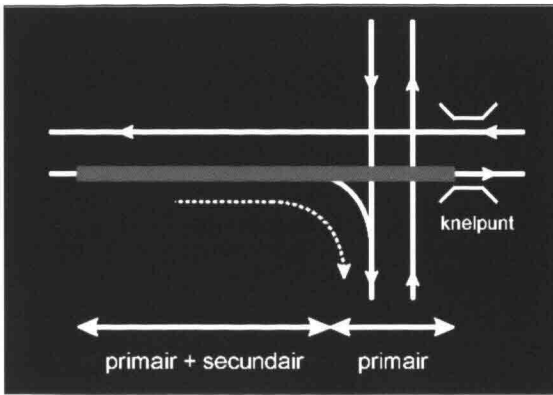
De laatste jaren neemt de congestie op wegennetten sterk toe, vooral rond stedelijke gebieden. Zowel het aantal, de duur als de lengte van structurele files laat een stijgende lijn zien. Dit leidt onder andere tot hogere transportkosten en een lagere betrouwbaarheid van reistijden.

Bovenop files die worden veroorzaakt door capaciteitsgebrek bij knooppunten, de zogenaamde primaire congestie, komen er meer en meer files die worden veroorzaakt door files, de zogenaamde secundaire congestie. Deze secundaire congestie ontstaat als een file zo lang wordt dat zij terugslaat op een bovenstrooms wegvak en daar de weggebruikers hindert die het fileveroorzakende knelpunt niet op hun route passeren (figuur 1).

Ondanks vele inspanningen is het einde van de groei van de automobiliteit nog niet in zicht. De belasting op het huidige wegennet zal sterk blijven toenemen, met als gevolg een stijging van het aantal knelpunten. Behalve de primaire congestie zal vooral de secundaire congestie een verdere toename van de voertuigverliesuren veroorzaken.

Voor het bestrijden van congestie zijn verschillende benaderingen mogelijk: maatregelen gericht op het tot stand brengen van wijzigingen in het vraagpatroon voor het verkeer, op vergroten van het infrastructurele aanbod door meer wegen aan te leggen en maatregelen met als doel de bestaande infrastructuur beter te benutten. Hierbij wordt, onder meer, gedacht aan het onderscheiden van doelgroepen met behulp van selectieve toeritdosering en/of selectieve wegen, zoals "pay-lanes".

Een veelbelovende maatregel om secundaire congestie te bestrijden die behoort tot de laatstgenoemde benadering, is de aanleg van buffers. Een buffer is een lokale verbre-



FIGUUR 1: Primaire en secundaire congestie.

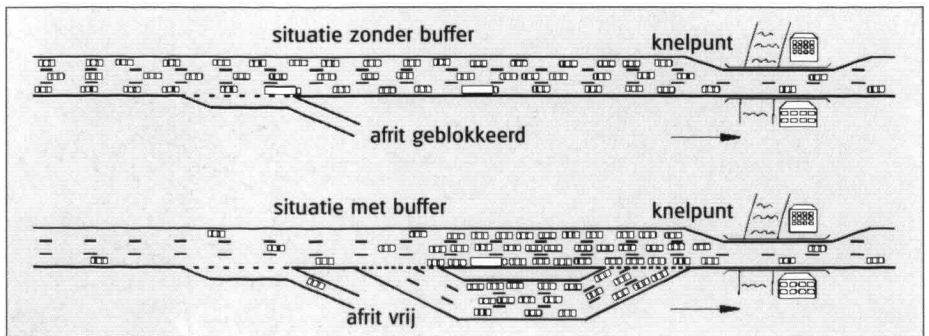
ding van de rijbaan, stroomopwaarts van een knelpunt, met als doel een file te verkorten, zodat er geen blokkade meer plaatsvindt van bovenstrooms gelegen knooppunten of afritten [0,1,2].

Bij de sectie Verkeerskunde van de TU Delft is een aantal studies verricht naar het ontwerp van en de verkeersafwikkeling bij buffers [3,4,5]. Dit artikel gaat in op werkingsprincipes en ontwerpvarianten van zulke buffers. Tevens zullen de resultaten van twee gevalsanalyses, zogeheten case-studies (Prins Clausplein bij Den Haag en het Terbregseplein bij Rotterdam), worden belicht.

SECUNDAIRE CONGESTIE EN BUFFERS

Een buffer bestaat uit één of meerdere extra rijstroken die plaatselijk zijn toegevoegd aan de bestaande rijstroken (figuur 2). De voorziening kan tijdelijk van aard zijn, als het capaciteitsgebrek van het knelpunt op termijn wordt opgelost, of permanent. Omdat de capaciteit van het knelpunt door de aanleg van een buffer niet wordt vergroot, blijft het knelpunt bestaan. Reistijdwinst is alleen te behalen voor het verkeer dat secundaire congestie ondervindt.

Het meest kenmerkende aspect van een buffer is dat de filelengte wordt verkort. Deze verkorting, die het gevolg is van een vergroting van de opstelruimte voor een file, is gebaseerd op een tweeledig werkingsprincipe:



FIGUUR 2: Fileverkortende werking van een buffer.

■ door het aantal voertuigen te verdelen over meer stroken, staan er minder voertuigen per strook en is de wachtrij dus korter. Zo zal bij een verbreding van de rijbaan van 2 naar 3 stroken, de filelengte als gevolg van de vergroting van de opstelcapaciteit, met een derde afnemen.

■ doordat de uitstroom in het knelpunt constant blijft en er meer stroken naar het knelpunt leiden, zal echter de gemiddelde snelheid van de voertuigen per strook in congestietoestand kleiner zijn. De voertuigen gaan dicht op elkaar rijden en de dichtheid per strook zal toenemen, waardoor een extra verkorting van de filelengte optreedt. Met name dit effect leidt tot sterk verkorte filelengtes [4].

De fileverkortende werking van een buffer is weergegeven in afbeelding 2, met als voorbeeld een extra rijbaangedeelte van 3 stroken. Een voorbeeld: bij een filelengte van 10 km bij 2 stroken leidt het toevoegen van 1 strook tot een filelengte van 4,4 km. Een uitbreiding met 2 stroken reduceert de file tot 2,8 km.

Behalve reductie van secundaire congestie, biedt een buffer de mogelijkheid om de doorstroming voor doelgroepen (bijvoorbeeld vrachtauto's) te verbeteren. Doordat de filelengte sterk is ingekort, kan veelal met een veel kortere doelgroepstrook worden volstaan, waardoor aanleg eerder haalbaar is.

ONTWERPVARIABLEN VAN EEN BUFFER

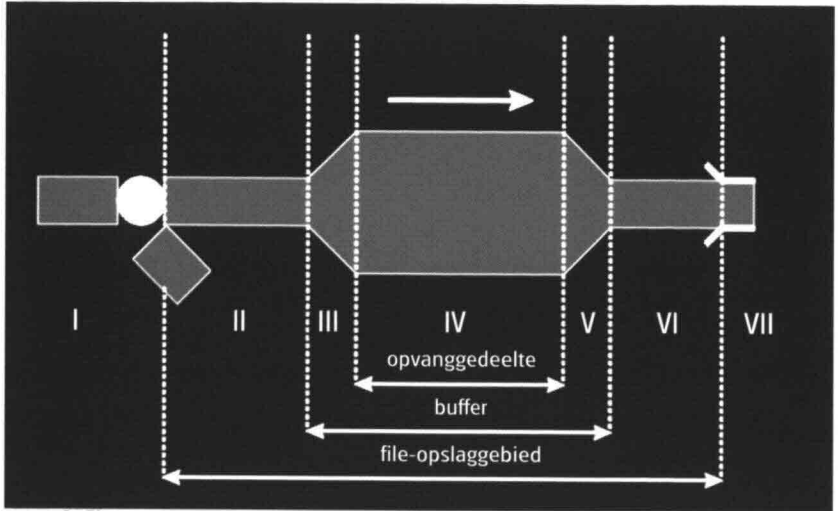
De buffer en zijn omgeving zijn op te delen in een aantal elementen met elk hun eigen functie en kenmerken (figuur 3) [4]:

Afhankelijk van de situatie kan de file in haar geheel in de buffer wordt opgevangen (delen III, IV en V), of kan ook deel II hiervoor worden gebruikt.

Een simpele, doch effectieve vorm van een buffer is de toevoeging van één extra strook aan de bestaande rijbaan. De fileverkortende werking hiervan is groot. Er zijn geen aanvullende voorzieningen nodig voor de bufferinvoer en -uitvoer en buiten de spits hoeft de strook niet afgesloten te worden. De kosten voor aanleg en beheer zijn beperkt.



Secundaire congestie bij de Velzertunnel.



FIGUUR 3: Elementen van een buffer en zijn omgeving

I Bovenstrooms van divergentiepunt

Als de file dit punt passeert, treedt stroomopwaarts van deze lokatie secundaire congestie op. Het divergentiepunt kan een uitvoeging of een splitsing zijn.

II Toevoergedeelte (bovenstrooms)

Dit is het gedeelte tussen het divergentiepunt en de bufferingang.

III Bufferingang

Het invoergedeelte is de overgang naar een groter aantal rijstroken, eventueel in de vorm van een extra rijbaan.

IV Opvanggedeelte

Dit is het gedeelte waar de voertuigen in wachtrijen staan 'opgeslagen'.

V Bufferuitgang

Hier vindt convergentie plaats van het aantal bufferstroken naar het aantal stroken van het wegvak stroomafwaarts.

VI Aansluitgedeelte

Het kan zijn dat de buffer niet direct aansluit op het knelpunt. In dat geval kan er nog een wegvak tussen de bufferuitgang en het knelpunt gelegen zijn.

VII Knelpunt

Dit is het fileveroorzakende element. De capaciteit van dit wegvak is kleiner dan de capaciteit van het bovenstrooms deel en ook kleiner dan de intensiteit van het verkeersaanbod tijdens de drukke periodes. Het knelpunt kan bijvoorbeeld een invoeging, een weefvak, een helling of een rijbaanversmalling zijn.

Als de hoeveelheid secundaire congestie met een enkele extra strook niet gereduceerd kan worden tot het gewenste niveau, kan besloten worden een buffer aan te leggen in de vorm van één of meerdere extra rijbanen. Het gebruik van die extra rijbaan is alleen toegestaan tijdens congestie. De buffer is dan 'open' en alle rijbanen functioneren als bufferrijbanen.

Het ontwerp van een buffer met één of meerdere extra rijbanen vraagt keuzes uit de volgende elementen [5]:

De ligging van de extra rijbaan ten opzichte van de bestaande rijbaan

De opties zijn: aan de linkerzijde, de rechterzijde of aan beide zijden van de bestaande rijbaan. In de meeste gevallen zal de middenberm niet breed genoeg zijn voor een extra rijbaan, zodat alleen de rechterzijde overblijft.

Beheersing van instroom

Er zijn drie varianten: een ongeregelde invoer, een invoer met een routeadvies en een invoer met een dwingende routetoewijzing.

- Bij een ongeregelde bufferinvoer kiezen de bestuurders een rijbaan, zonder dat ze over informatie beschikken over de filelengtes op de bufferrijbanen. Bestuurders die gebruik maken van de extra rijbaan, moeten uitvoegen.

- Bij een bufferinvoer met een routeadvies worden bestuurders ruim voor de bufferinvoer over de situatie in de buffer geïnformeerd. Ze zijn vrij in hun rijbaankeuze.

- Bij een bufferinvoer met een dwingende routetoewijzing zijn bestuurders verplicht gebruik te maken van een bepaalde bufferrijbaan.

Geometrie van de bufferingang

De toegang tot de extra rijbaan kan vormgegeven worden als een enkelstrooks, tweestrooks, taper of een dubbele taperuitvoeging. De keuze van het type uitvoeging wordt mede bepaald door de wijze waarop de instroom wordt beheerst.

Het aantal en de lengte van de extra stroken

De afmetingen van een buffer moeten dusdanig zijn, dat de hoeveelheid secundaire congestie wordt gereduceerd tot een aanvaardbaar niveau. Dit is een probabilistisch ontwerpprobleem. Om de afmetingen van een buffer te kunnen bepalen, moet de kansverdeling van het aantal voertuigen in de file worden geschat. Bij de berekening hiervan dient rekening gehouden te worden met toekomstige ontwikkelingen in het wegennet en een mogelijk groeiende vraag gedurende de levensduur van een buffer. In de praktijk kunnen de gewenste afmetingen van een buffer beperkt worden door de beschikbare ruimte.

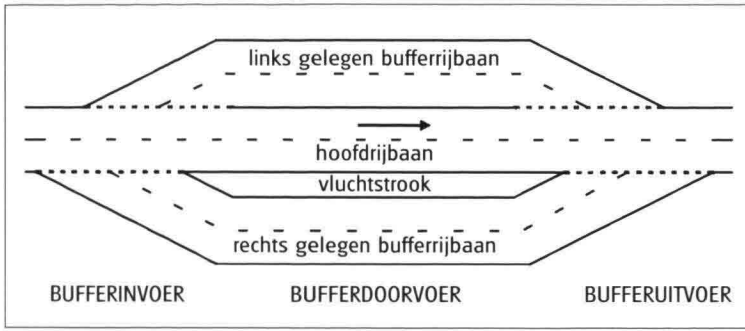
Beheersing van de uitstroom

Er zijn twee varianten: een ongeregelde uitvoer en een geregelde uitvoer.

- Bij een ongeregelde uitvoer moet het verkeer dat gebruik maakt van de extra rijbaan, invoegen op de hoofdrijbaan.

- Bij een geregelde uitvoer vervalt het invoegproces. Verkeerslichten laten bestuurders van de verschillende stroken beurtelings de buffer verlaten. Er kan een regeling toegepast worden waarbij per fase stroken van verschillende bufferrijbanen groen krijgen, of een regeling waarbij een fase slechts stroken van één bufferrijbaan bevat.

Door het aantal voertuigen te verdelen over meer stroken staan er minder voertuigen per strook.



FIGUUR 4: Schematische weergave van een buffer met extra rijbanen.

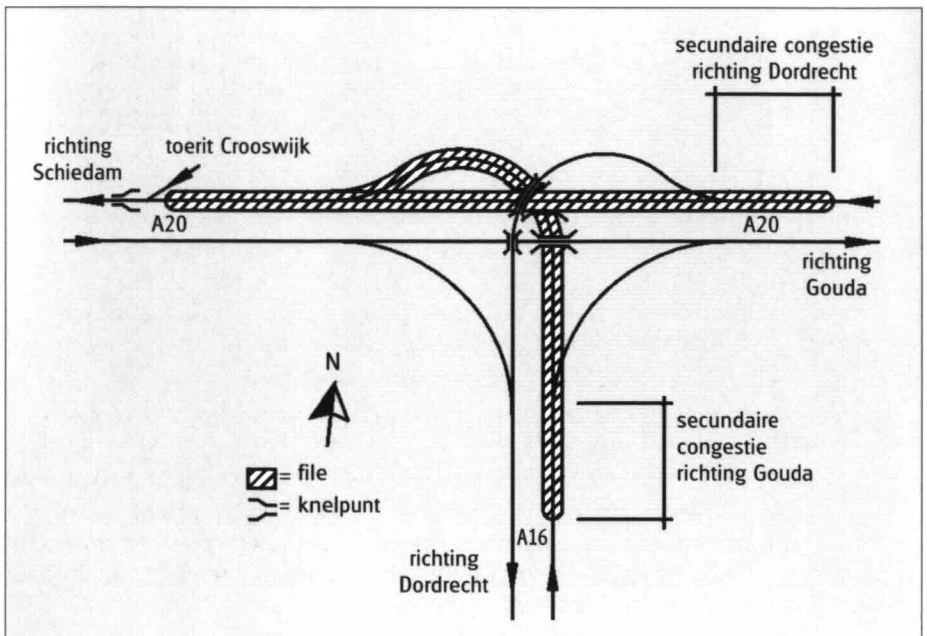
Geometrie van de bufferuitvoer

Het convergentiepunt van de extra rijbaan en de hoofdrijbaan kan worden vormgegeven als een enkelstrooks, tweestrooks, taper of een dubbele taperinvoeging. Het type invoeging is gerelateerd aan de beheersing van de uitstroom.

figuur 4 geeft schematisch een buffer weer, bestaande uit een tweestrooks hoofdrijbaan en twee extra tweestrooks rijbanen.

ONTWERP CASE-STUDIE TERBREGSEPLEIN

Het Terbregseplein is een belangrijk knooppunt in de Ring rond Rotterdam. In de spits komt er echter regelmatig congestie voor. Het knelpunt dat in de ochtendspits secundaire congestie veroorzaakt, is de toerit Crooswijk (figuur 5).



FIGUUR 5: Secundaire congestie op het Terbregseplein in Rotterdam.

Verkeer uit de richting Dordrecht met bestemming in de richting Gouda en vice versa ondervindt secundaire congestie. De twee rijbanen richting Schiedam, beide bestaand uit twee rijstroken, voegen samen tot een vierstrooks rijbaan, die verder stroomopwaarts versmalt tot een driestrooks rijbaan. De intensiteit op toerit Crooswijk bedraagt in de ochtendspits circa 1300 voertuigen per uur. De intensiteit van het vrachtverkeer op de - in 1997 geopende - doelgroepstrook wordt geschat op 500 voertuigen per uur in de ochtendspits.

Secundaire congestie ontstaat als de A20-file voor de toerit Crooswijk langer wordt dan 5 km. Door nu een buffer aan te leggen tussen de toerit Crooswijk en het Terbregseplein, kan worden voorkomen dat langere files secundaire congestie veroorzaken [5]. De afmetingen van de buffer zijn in deze case-studie gebaseerd op een maximale individuele wachttijd van 15 minuten. Dit betekent dat de opstelcapaciteit van de buffer moet voldoen aan de eis dat er net geen secundaire congestie optreedt, als de wachttijd voor de bestuurders die achterin de file aansluiten, 15 minuten bedraagt.

De ruimte voor een buffer is beperkt. De beschikbare afstand tussen het knelpunt en het punt waar blokkade optreedt, ongeveer 5 km, wordt gereduceerd door de lengte die nodig is om de buffer aan te kondigen, en door kunstwerken. De lengte die overblijft, bedraagt ca. 2,5 km.

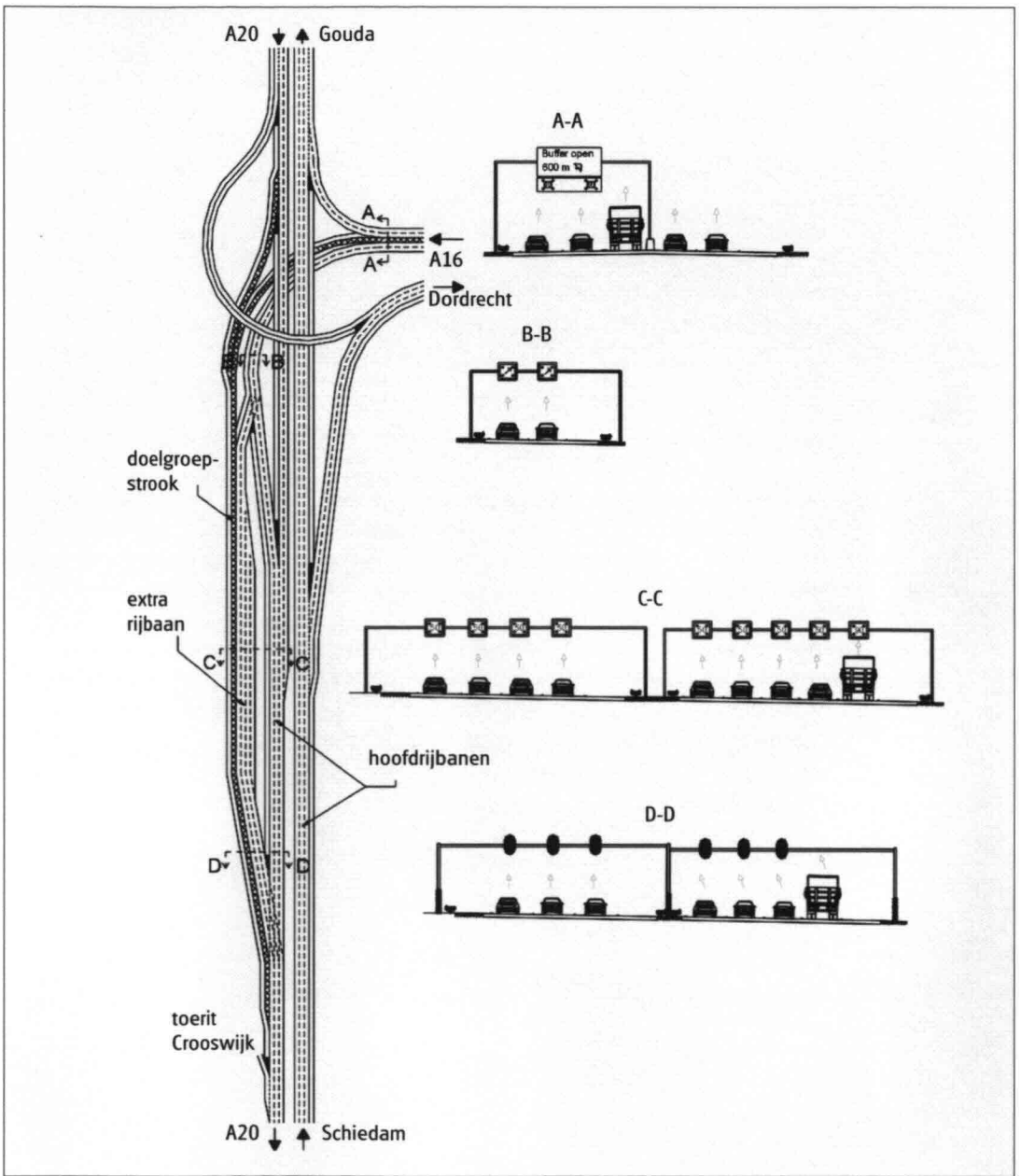
Op basis van de capaciteit van de bottleneck, de intensiteit op de A20 en de intensiteit op de toerit Crooswijk, kunnen de gewenste afmetingen van de buffer worden bepaald (tabel 1). Het aantal bufferstroken is gelijk aan het aantal bestaande stroken (3) plus het aantal extra stroken (2, 3, 4 of 5).

| aantal bufferstroken | lengte van de buffer |
|-----------------------------|-----------------------------|
| 5 (3+2) | 3,5 km |
| 6 (3+3) | 2,5 km |
| 7 (3+4) | 2,0 km |
| 8 (3+5) | 1,6 km |

TABEL 1: Noodzakelijke lengte van de buffer in relatie tot het aantal bufferstroken.

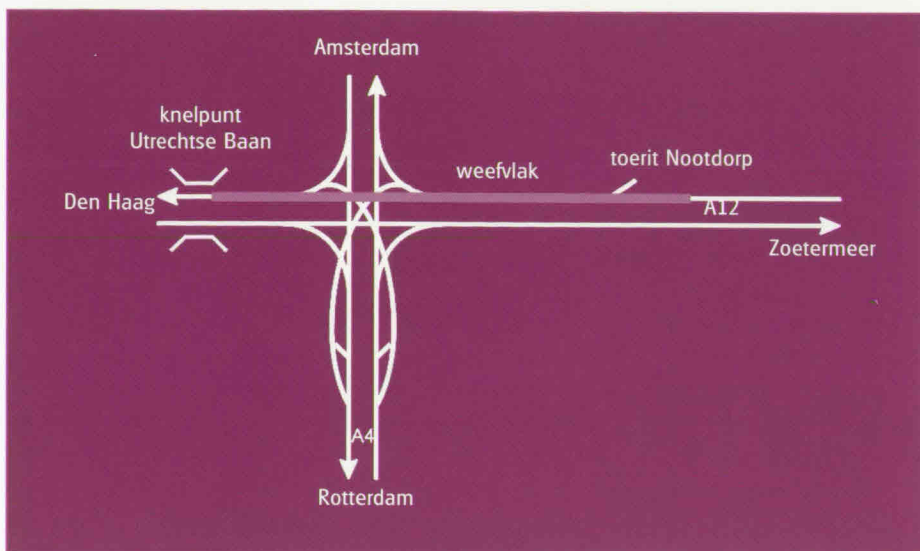
Gegeven de beschikbare ruimte, is gekozen voor een buffer bestaande uit de driestrooks hoofdrijbaan en een vierstrooks extra rijbaan. Tijdens congestieperiodes wordt de extra rijbaan opengesteld. De extra rijbaan is alleen bereikbaar voor het verkeer afkomstig van de A16 (figuur 6). De hoofdrijbaan wordt in congestieperiodes alleen gebruikt door verkeer uit de richting Gouda.

Op de A16 wordt de buffer aangekondigd vlak na de splitsing (doorsnede A-A), ongeveer 600 meter stroomopwaarts van de bufferinvoer. Op 300 meter voor de invoer wordt met signalering aangegeven welke route dient te worden gevolgd. Dit wordt herhaald ter hoogte van de invoer (doorsnede B-B). In de buffer wordt de maximumsnelheid stapsgewijs verlaagd om kop-staartbotsingen aan de staart van de file te voorkomen (doorsnede C-C). De verkeerslichten worden dicht bij het punt geplaatst waar beide rijbanen samenkomen (doorsnede D-D). Het vrachtverkeer op de doelgroepstrook krijgt vrije doorgang bij de verkeerslichten.



FIGUUR 6: Ontwerp van een buffer tussen toerit Crooswijk en het Terbrugseplein.

SIMULATIE CASE-STUDIE PRINS CLAUSPLEIN De situatie op het Prins Clausplein bij Den Haag is vergelijkbaar met die op het Terbrugseplein bij Rotterdam. Ook het Prins Clausplein is een belangrijk knooppunt in het wegennet dat wordt geconfronteerd met secundaire congestie. In de ochtendspits ontstaat er doorgaans een file op de A12 richting Den Haag, vanwege een beperkte capaciteit op de Utrechtse Baan. Deze kan het verkeer dat vanaf de A12 Zoetermeer en de A4 (noord en zuid) komt en dat Den Haag in moet, niet verwerken. Regelmatig slaat de file terug op de A12, tot voorbij het weefvak tussen de toerit Nootdorp en de afrit naar de A4. Hierdoor wordt het verkeer van de



FIGUUR 7: Secundaire congestie op het PrinsClausplein.

A12 richting de A4 gehinderd, hoewel dit verkeer niet door het fileveroorzakende knelpunt hoeft (zie figuur 7).

Door een buffer te situeren tussen de invoeging van de A4 op de Utrechtse Baan en het weefvlak op de A12, wordt de filelengte dusdanig ingekort, dat het secundaire deel van de congestie wordt voorkomen.

Met behulp van simulatie is de geschiktheid van verschillende bufferontwerpen vergeleken [4]. Dit is gedaan voor de situatie in 2010.

De volgende varianten zijn beschouwd:

Referentie (figuur 8a)

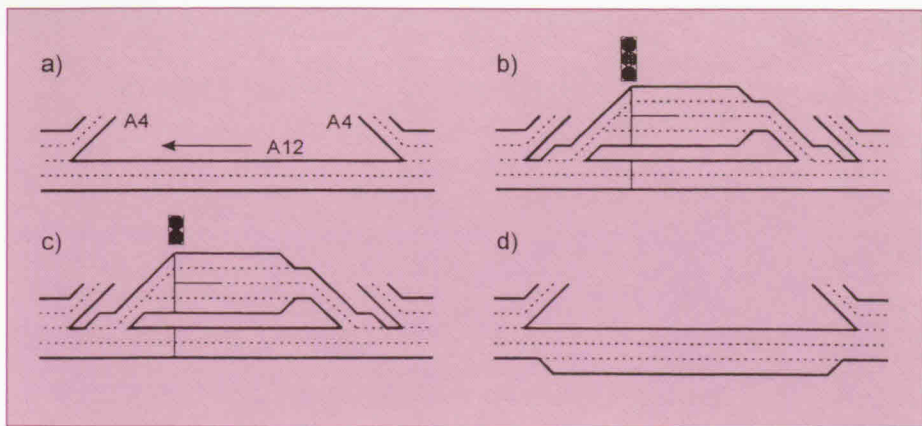
Na het weefvlak van 4 stroken, bestaat de A12 nog uit 2 stroken. Het wegvak tussen de verbindingen met de A4 is ongeveer 1650 meter lang.

Variant 1 (figuur 8b)

Er worden vier extra stroken op een aparte rijbaan aangelegd, waarbij de bufferuitstroom wordt geregeld. De toegang tot de extra rijbaan is uitgevoerd als een tweestrooks taperuitvoeging. De uitvoeging gaat daarna over tot vier stroken. Vervolgens worden de vier stroken door middel van een doorgetrokken lijn gesplitst in 2x2 stroken. Na de regeling versmalt de rijbaan van vier naar twee stroken. De uitstroom wordt geregeld met verkeersregelinstallaties, met een cyclustijd van 120 seconden. De drie opstelvakken van elk twee stroken krijgen om beurten evenveel groen.

Variant 2 (figuur 8c)

Deze variant onderscheidt zich alleen van variant 1 op het punt van de uitstroomregeling, namelijk dosering.



AFBEELDING 8: Buffervarianten.

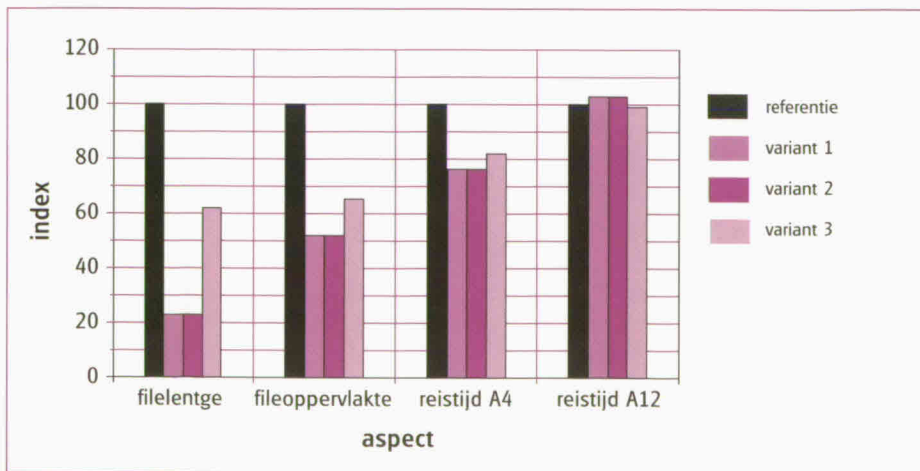
Variant 3 (figuur 8d)

Het meeste eenvoudige ontwerp bestaat uit één extra strook aan de linkerzijde van de bestaande rijbaan. Een voorwaarde voor het functioneren van deze variant is wel dat de extra strook tijdens congestie wordt benut en er pas op het einde van de bufferstrook van strook wordt gewisseld.

De resultaten van de simulaties zijn samengevat in een staafdiagram (figuur 9).

Filelengte en fileoppervlak

De filelengte in de referentiesituatie, 6,5 km, kan met de buffervarianten 1 en 2 worden teruggebracht tot 1,5 km, waarbij geen secundaire congestie meer optreedt. Bij variant 3 kan het overschot niet geheel in de buffer worden opgevangen, waardoor de filelengte nog zo'n 4 km bedraagt. Het fileoppervlak, uitgedrukt in strookkilometers, wordt met de grote varianten ongeveer gehalveerd. Ook bij variant 3 vindt er al een veel effectievere opslag plaats.



FIGUUR 9: Resultaten simulatie case-studie Prins Clausplein.

Reistijd A4

Het verkeer dat naar de A4 afslaat, ondervindt een sterke reistijddaling als gevolg van het verdwijnen van secundaire congestie. Bij varianten 2 en 3 bedraagt dit gesommeerd over de betrokken voertuigen zo'n 220 uur per ochtendspits (hetgeen het maximale te vermijden reistijdverlies is). Bij variant 3 is dit nog altijd 160 uur.

Reistijd A12

Het verkeer richting Den Haag ondervindt gemiddeld slechts een beperkte verandering in reistijd. Verrassend is dat variant 3 een kleine daling van de reistijd tot gevolg heeft. Bij de varianten 1 en 2 is de gemiddelde reistijd iets hoger dan bij de referentie.

TENSLLOTTE Met de simulatie van de case-studie is aangetoond dat zelfs de aanleg van een relatief eenvoudige buffer (van een enkele rijstrook) uitermate zinvol is om de aanzienlijke reistijdverliezen, ontstaan door secundaire congestie, te voorkomen. Het ontwerp van de case-studie heeft laten zien dat het mogelijk is om grotere varianten van buffers (met een extra rijbaan) toe te passen bij bestaande knelpunten. Gezien de toenemende omvang van secundaire congestie op het Nederlandse hoofdwegennet, lijkt de weg vrij voor het aanleggen van buffers.

NOTEN

- 0 Transpute
Opvangruimtes, rijbaanscheiding en rijbaandosering; maatregelen om het dichtslibben van het hoofdwegennet tegen te gaan, deel 1: Uitwerking van oplossingsrichtingen, i.o.v. Min. V&W DG voor het Vervoer, Directie Individueel Personenvervoer, Den Haag, april 1993.
- 1 Transpute
Opvangruimtes, rijbaanscheiding en rijbaandosering; maatregelen om het dichtslibben van het hoofdwegennet tegen te gaan, deel 2: Vormgevingsaspecten, i.o.v. Min. V&W DG voor het Vervoer, Directie Individueel Personenvervoer, Den Haag, december 1993.
- 2 Adviesdienst Verkeer en Vervoer
Handboek Buffers en Pilot-ontwerp; uitgevoerd door Heidemij, i.o.v. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Adviesdienst Verkeer en Vervoer, februari 1997.
- 3 Lambrechtsen, J.J., Schuurman, H., Bovy, P.H.L.
Bufferruimtes in het hoofdwegennet; TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Sectie Verkeerskunde, afstudeerrapport, Delft, 1996.
- 4 Schoemakers, M., Minderhoud, M.M., Vermijs, R.G.M.M., Bovy, P.H.L.
Buffers in het autosnelwegennet, effect van ontwerp op de verkeersafwikkeling;
TU Delft, Faculteit der Civiele techniek, Sectie Verkeerskunde, Rapp. Nr. VK 2205.316, Delft, mei 1997.
- 5 Broeren, P.T.W., Hansen, I.A., Westland, D.
Buffers: B priori keuzen voor het ontwerp; TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Sectie Verkeerskunde, Rapp. Nr. VK 2205.319, Delft, juni 1997.

OP DE AUTOMATISCHE
PILOOT DOOR DE
RANDSTAD?

Rijden zonder handen en voeten

9
R. van der Heijden
V. Marchau
E. Molin
K. van Wees

• • •

In de luchtvaart is de automatische piloot al lang en breed ingeburgerd, in het verkeer gebruikt de bestuurder nog steeds beide handen en voeten. Waarom eigenlijk? Is het niet mogelijk om in de drukbereden Randstad speciale banen aan te leggen, waar autobruikers op de automatische piloot kunnen rijden? Vooralsnog niet, concluderen vier onderzoekers van de TU Delft. Technisch is de Automatische Voertuigbesturing of -Geleiding (AVG) een uitdaging, maar er zijn nog te veel uiteenlopende grote onzekerheden om deze intelligente technologie in het wegverkeer toe te passen.

• • •

De belangstelling voor het intelligenter maken van verkeer en vervoer is in de afgelopen jaren sterk toegenomen. Intelligentie betekent vooral het toepassen van geavanceerde elektronica en informatie- en communicatiesystemen (zie bijvoorbeeld Van der Veer e.a., 1995; Bovy en Minderhoud, 1996). Door met behulp van deze systemen ketens van verplaatsingen van goederen en mensen te volgen, kunnen reizigers en logistieke dienstverleners sneller en betrouwbaarder worden geïnformeerd. Denk aan de verkeersinformatie op de weg, of de just-in-time bevoorrading van productiebedrijven. Ook stellen dergelijke systemen ons in staat om bepaalde routinematige handelingen in het verkeer te automatiseren. Denk aan de tijd- en plaatsgebonden betaling voor het gebruik van het hoofdwegennet in de naaste toekomst.

Een deel van de discussie over intelligentere transportsystemen richt zich op de automatisering van taken van de bestuurder in het wegverkeer: het terrein van Automatische Voertuigbesturing of -Geleiding (AVG) (Hoedemaecker e.a., 1996). Gevoed door recente internationale technologische ontwikkelingen, proefprojecten in onder andere de VS en veronderstellingen over positieve bijdragen aan doorstroming op de weg, verkeersveiligheid en reizigerscomfort, ontstaan beelden van **road-trains** van individuele voertuigen, die **hands-off** and **feet-off** over speciale banen worden geleid. De gebroeders Das hebben dergelijke beelden letterlijk en op appellerende wijze aan het papier toevertrouwd (Das en Das, 1992). Wat in de luchtvaart realiteit is, kan toch ook in andere vervoerwijzen worden gerealiseerd? zo is de gedachte. De bewijzen worden geleverd met onder andere automatisch geleide vrachtwagens in het project Combi Road, de toepassing van **people mover**-systemen (zoals in het Rivium-project in Capelle



Peloton rijden tijdens een demonstratie in San Diego in augustus 1997. Magneten op regelmatige afstand in het wegdek zorgen voor de geleiding van de auto's.

© Bill Stone, PATH, San Diego, USA

aan de IJssel) en de AVG-illustratieprojecten in San Diego (1997) en Zoeterwoude (1998). Toch willen wij deze toekomst, zoals weergegeven in de titel van dit artikel, voorzien van een vraagteken. Daarmee wordt tot uitdrukking gebracht dat de toekomst nog ver weg ligt en dat het allerminst zeker is dat ontwikkelingen komende decennia op grote schaal richting automatische piloot zullen gaan. Dat er nog een lange weg te gaan is, komt niet alleen tot uitdrukking in het recent onder leiding van de departementale Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV) opgestelde Business Plan Automatische Voertuig Besturing, maar is ook gebaseerd op lopend onderzoek binnen de Onderzoekschool Transport, Infrastructuur en Logistiek (TRAIL).

Dit artikel beoogt het vraagteken toe te lichten en enkele resultaten van onderzoek te presenteren. De ruimte is beperkt, maar er wordt verwezen naar achterliggende publicaties, waarin de geïnteresseerde lezer uitgebreidere informatie kan vinden. In dit artikel worden onzekerheden rond de toekomstige technologische ontwikkeling van AVG, de mogelijke gevolgen van AVG voor de verkeersveiligheid en juridische aansprakelijkheid, en de vraag naar draagvlakvorming bij gebruikers van AVG nader uitgewerkt.

ONZEKERHEDEN OVER AUTOMATISCHE VOERTUIGGELEIDING

Het klassieke beeld van de ingenieur is dat deze zich min of meer afgesloten van de maatschappelijke buitenwereld, bezighoudt met het optimaliseren van een technische oplossing voor een maatschappelijk vraagstuk. Door toepassing van uitsluitend technische rationaliteiten past de ontwikkelde oplossing echter veelal niet bij de belangen, voorkeuren en wensen die in de maatschappelijke buitenwereld dominant zijn en daar vaak ook onderhevig zijn aan dynamiek. Een botsing van rationaliteiten is het resultaat. Een botsing die zich uit in mislukte of niet-voorzien toepassing van technologie, moeizaam verlopende grote projecten, of uitgewerkte ideeën waar geen 'markt' voor bestaat (zie o.a. De Bruijn e.a., 1996). De boodschap is dat ook de ingenieur meer aandacht dient te hebben voor de onzekerheden in technologie-ontwikkeling en -toepassing en meer vaardigheid dient te ontwikkelen in het organiseren en regisseren van de ontwerp- en besluitvormingsprocessen waarin deze onzekerheid een cruciale rol vervult (Banister, 1994; Van der Heijden, 1996).

Dit geldt zeker ook voor automatische voertuiggeleiding (Underwood, 1990). Eerder

identificeerden we daarom de belangrijkste onzekerheden op dit terrein (Van der Heijden en Marchau, 1996) als onderdeel van een omvangrijker onderzoeksprogramma binnen TRAIL over technologieverkenning AVG. We hebben te maken met zogenoemde systeem-interne zowel als systeem-externe onzekerheden, die bovendien onderling interdependenties vertonen. De systeem-interne onzekerheden zijn verbonden met twee typen van vraagstukken:

- Hoe ontwikkelen zich de technologieën die de sleutel vormen voor AVG-toepassingen? Over dit punt merken we op, dat de beelden over de stand van de techniek uiteenlopen (zie o.a. Hall en Tsao, 1994; Shladover, 1995). Een belangrijke vraag in dit kader is bijvoorbeeld of de nadruk zal liggen op technologie voor besturingssystemen gebaseerd op communicatie van het voertuig met andere weggebruikers, of dat de systemen gebaseerd zijn op waarneming en communicatie via de infrastructuur, of dat er combinaties van technologieën zullen worden toegepast.

- Hoe is de relatie tussen vormen van AVG en de effecten op het verkeersgedrag? We hebben hier te doen met een belangrijk punt vanwege de maatschappelijke doelen die met verkeersbeleid worden nagestreefd: met name betere benutting van de wegcapaciteit, meer veiligheid, grotere doorstroming (Levine en Underwood, 1996). Als AVG aan deze doelen bijdraagt, draagt het ook bij aan het nationale verkeersbeleid. Of ze bijdragen is echter allerm minst zeker (Hoedemacker e.a., 1996; Marchau en Van der Heijden, 1997a). Positieve verwachtingen in dit opzicht blijken veelal meer gebaseerd op veronderstellingen dan daadwerkelijk toetsend onderzoek.

De systeem-externe onzekerheden hebben te maken met de dynamiek in de bestuurlijk-maatschappelijke omgeving van AVG-toepassingen. De belangrijkste punten op dit vlak zijn:

- Het implementatieproces is een lange-termijnproces met een grootschalig en ingrijpend karakter. In de loop van de tijd kunnen maatschappelijke preferenties veranderen, doordat bijvoorbeeld de risicoperceptie verandert of door acceptatie van de inperking van de individuele vrijheid. Deze veranderingen kunnen leiden tot nieuwe kwaliteitseisen aan de te implementeren technologie. Kortom: hoe accepte-



© Philip Broos

Beeldscherm en bediening van de besturingseenheid voor pelotonrijden in een Buick.

ren weggebruikers nieuwe besturing-ondersteunende technologie in hun voertuigen?

■ Een ander punt is dat het politiek-bestuurlijk draagvlak voor AVG-toepassingen kan veranderen, omdat bijvoorbeeld uit nadere studies andere effecten blijken dan aanvankelijk werd verwacht, of omdat er te veel tegenstrijdigheden gaan ontstaan met breed geaccepteerde beleidsdoelen op het gebied van verkeer en vervoer. Ook kan zich een legitimeringsvraagstuk voordoen bij benodigde grootschalige investeringen in infrastructuur-aanpassingen. Is publiek-private samenwerking op dit terrein mogelijk?

■ Tenslotte kan zich de noodzaak voordoen van veranderingen in bepaalde institutionele kaders, zoals bijvoorbeeld wetgeving over aansprakelijkheid bij ongevalschade of een andere organisatie van wegbeheer. Weten we al hoe en wat er moet veranderen en welke weerstanden er eventueel te verwachten zijn?

De conclusie is dat, waar tot nu toe internationaal een zwaar accent in de ontwikkeling van automatische voertuigbesturingstechnologie heeft gelegen bij de technische ontwerppoging, er in toenemende mate behoefte is aan onderzoek dat gericht is op het onderkennen, structureren, hanteerbaar maken en zo mogelijk reduceren van onzekerheden gerelateerd aan invoering van AVG-technologie in de praktijk van alledag. In de navolgende paragrafen worden enkele onzekerheden wat verder uitgediept aan de hand van lopend onderzoek.

ONZEKERHEDEN OVER TECHNOLOGISCHE ONTWIKKELING

In 1997 is, met behulp van de Delphi-onderzoeksmethode, een groep internationale experts geconsulteerd met betrekking tot hun zienswijze op de ontwikkeling van technologie ter ondersteuning van (uiteindelijk) automatische voertuig geleiding. De Delphi-methode structureert hierbij de opinies van experts op een bijzondere manier. Een groep experts krijgt een aantal keren eenzelfde lijst vragen voorgelegd. Vanaf de tweede vraagronde krijgt iedere expert naast zijn of haar antwoorden uit de vorige ronde ook de opinies van de andere experts meegestuurd. De experts worden nu gevraagd om hun antwoorden uit de vorige ronde te evalueren en indien gewenst aan te passen, gegeven de opinie van de totale groep. Het doel van de deze aanpak is om consensus te verkrijgen onder de experts over een subject van onderzoek. Het aantal rondes is afhankelijk van de door de onderzoeker gewenste mate van consensus. In deze Delphi studie werden de experts drie rondes ondervraagd. In de eerste ronde werd hun mening gevraagd over een aantal items, op basis van een gestructureerde vraag- en antwoordenlijst. De resultaten werden verwerkt en de groep werd in de tweede ronde geconfronteerd met de groepsresultaten uit de eerste ronde. Wederom werd hun mening gevraagd. Tenslotte werden de experts in de derde ronde geconfronteerd met de resultaten uit de vorige ronde en werd hen gevraagd commentaar te geven op hun scores, met name als die bleven afwijken van het groepsgemiddelde. In de eerste ronde werden 117 experts benaderd verspreid over Europa, Japan en Amerika, waarvan 65 aan het onderzoek meededen. Van de 65 deden er 50 aan de tweede ronde mee. In de derde ronde werden 40 ingevulde vragenlijsten ontvangen. De experts waren behoorlijk verdeeld over overheden, kennisinstituten, bedrijfsleven en adviesbureaus.

Inhoudelijk werd gevraagd naar verschillende aspecten van vijf typen rijtaak-ondersteuning:

- 1 ondersteuning voertuigvolgen of intelligente cruise control
- 2 front obstakel botsingsvermijding
- 3 koershoud-ondersteuning
- 4 zijobstakel- botsingsvermijding
- 5 de automatische piloot.

De aspecten betroffen de ontwikkeling van de technische prestatie in de tijd, de toepassingsmogelijkheden, de bijdragen aan verkeersdoelen, de mogelijke barrières voor invoering en mogelijke beleidslijnen. Zoals gebruikelijk werd ook enige achtergrondinformatie over de experts verzameld. De resultaten van de studie zijn vastgelegd in een rapport (Marchau en Van der Heijden, 1997). In dit verband is het interessant het volgende te vermelden:

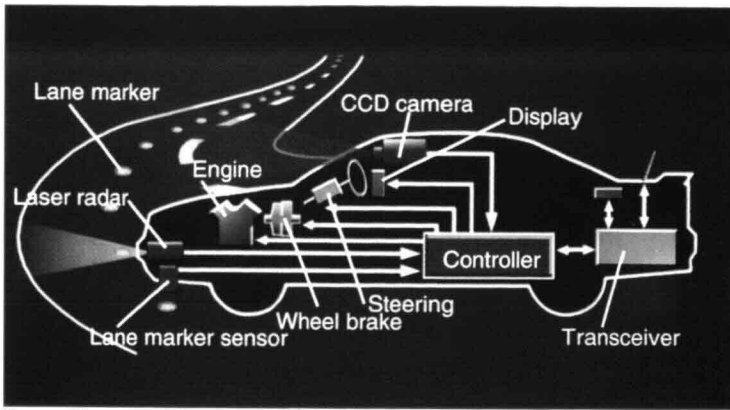
- De experts geven systematisch voor alle onderscheiden technologieën aan dat toepassingen die de bestuurder waarschuwen en adviseren om rijgedrag aan te passen steeds 5 tot 10 jaar eerder op de markt komen dan toepassingen die zonder tussenkomst van de bestuurder ingrijpen op de voertuigbesturing. Van de automatische piloot worden niet eerder marktintroducties verwacht dan in de periode 2010-2020 (door ruim 1/3 van de experts) danwel pas ná 2020 (bijna de helft van de experts). De bovengenoemde deelsystemen kennen eerdere toepassingen;

- De geschatte kosten voor de waarschuwende systeem-toepassingen liggen tussen de \$500 en \$1000, die van de ingrijpende systemen een factor 1,5 à 2 keer zo hoog. De extra kosten van de autopilot worden geschat op liggend tussen \$2500 en \$5000. De experts zien de toepassingsmogelijkheden vooral op wegtypen die betrekkelijk eenduidig zijn qua verkeerssituaties: speciale rijstroken, snelwegen en autowegen. In termen van doelgroepen voor toepassing worden vooral vrachtvervoerders, zakelijke rijders en woon-werkverkeer genoemd;



© Meetkundige Dienst Rijkswaterstaat, Delft

De Parkshuttle, passagiersvoertuig zonder chauffeur (people mover) op een demonstratiedag



Voorstelling van elektronica-toepassingen waaraan door Mitsubishi in Japan wordt gewerkt in het kader van Automated Highway System-programma.

■ De mening van de experts over de bijdrage van de systemen aan verschillende maatschappelijke doelen blijkt variërend. De experts zijn niet al te zeker over de bijdrage aan de wegveiligheid, uitgedrukt in termen van de kans op respectievelijk het effect van ongevallen. Dit geldt zelfs voor de automatische piloot. Nieuwe technologie kan ons op dit punt voor nieuwe problemen stellen, zoals omvangrijkere ongevallen bij een dalende kans. Nog onzekerder zijn de experts over de vergroting van de weggcapaciteit: het is niet onwaarschijnlijk dat de toepassing van nieuwe technologieën vereist dat de afstelling voor de volgafstand tussen voertuigen groter is dan de huidige praktijk laat zien. Overigens onderscheidt de automatische piloot zich in dit opzicht positief. Het meest onzeker zijn de experts over de bijdrage van deze systemen aan beperking van de omgevingshinder (energiegebruik en emissies).

■ Technische barrières voor de invoering van AVG-ondersteunende technologieën zijn er nog voldoende. Functionele onbetrouwbaarheid (het systeem ondersteunt niet wanneer we dat verwachten) en gebrek aan accuraatheid (het systeem doet iets anders dan we verwachten), blijken volgens de experts voor alle systemen (zeer) belangrijke barrières. Voor de automatische piloot zijn verder vooral de problematiek van de afstemming van de verschillende parameters van het systeem, de complexiteit van de automatische beslissings-algoritmen en de kwaliteit van de toegepaste software grote hobbels. Er blijkt aanzienlijke variëteit in de meningen van de experts over de criteria waarop de parameters van de systemen moeten worden afgestemd: op de wegveiligheid, het comfort, de wegbenutting?

■ De effecten op het rijgedrag worden door de experts als overwegend positief ingeschat. Het meest onzeker is men of het gebruik van de technologie compenserend gedrag oproept en wellicht in bepaalde gevallen verlies aan vaardigheden.

■ Tenslotte zien de experts, gevraagd naar hun mening over algemene barrières voor invoering, het aspect van aansprakelijkheidsverdeling over gebruikers, producenten, wegbeheerders als één van de meer belangrijke vraagstukken. Voorts wordt onzekerheid over de beeldvorming van de gebruikers van de bruikbaarheid c.q. het nut van dergelijke systemen genoemd: zonder positieve beeldvorming geen aanschaf bij gewone marktintroductie. Tenslotte zouden de kosten wel eens te hoog kunnen zijn. Voor de automatische piloot wordt bovendien nog specifiek de omvang van de infrastructuur-investeringen genoemd en, daarmee samenhangend, de toepasbaarheid op slechts een beperkt deel van het wegennet.

Het beeld dat uit de consultatie van internationale experts resulteert is dat de toepassing van nieuwe AVG-technologen niet zonder slag of stoot zal verlopen. Lang niet alle technische vraagstukken zijn opgelost; een evolutionair ontwikkelingspad lijkt het meest plausibel. Het maatschappelijk nut van toepassing is niet onomstotelijk vastgesteld en dat werkt voor sommige ontwikkelingen erg belemmerend. Als de bijdrage aan maatschappelijke verkeersdoelstellingen niet helder is, waarom zou de overheid dan bijvoorbeeld investeren in de infrastructuur om een ontwikkeling als de automatische piloot te faciliteren? Voor de experts is de automatische piloot daarom nog behoorlijk ver weg; volgens sommigen komt deze vorm er zelfs niet op grote schaal. Duidelijk is dat op veel fronten nog meer onderzoek nodig is. Op enkele aspecten, die refereren aan de hiervoor genoemde algemene barrières, wordt in de twee volgende paragrafen ingegaan: veiligheid, aansprakelijkheid en de beeldvorming door potentiële gebruikers.

ONZEKERHEDEN OVER VEILIGHEID EN AANSPRAKELIJKHEID Uit het Delphi-onderzoek bleek onder andere dat de experts niet collectief overtuigd zijn van de positieve veiligheidseffecten van nieuwe voertuigtechnologie. Enerzijds komt dit voort uit twijfel of deze technologie wel voldoende robuust is om verschillende onveiligheidssituaties, die vrijwel altijd het gevolg zijn van complexe samenlopen van omstandigheden, 'aan te kunnen'. Anderzijds wordt het effect van meer risicovol rijgedrag niet uitgesloten. Deze gevoelens van twijfel corresponderen met de resultaten van een recente verkennde studie, uitgevoerd in opdracht van de Raad voor Verkeersveiligheid (Marchau en Van der Heijden, 1997). Doel van de studie was een overzicht te krijgen van verschillende voor het wegverkeer relevante technologische ontwikkelingen, om vervolgens na te gaan wat in de internationale literatuur is gerapporteerd over de veiligheidseffecten van deze verschillende technologieën.

Om structuur te geven aan de verkenning is in de eerste plaats een gelaagd systeembeeld voor verkeersveiligheid gespecificeerd. Daarbij wordt onderscheid gemaakt naar technologie op het niveau van (1) de fysieke infrastructuur, (2) de verkeersstromen op de infrastructuur, (3) de voertuigen in de verkeersstromen en (4) de actoren (mensen zowel als bedrijven) die beslissingen nemen waar verplaatsingen met bepaalde voertuigen het resultaat van zijn. Voor ieder van die systeemlagen worden nieuwe telematicasystemen ontwikkeld danwel reeds toegepast. Een 20-tal systemen werd onderscheiden. In de tweede plaats zijn veiligheidseffecten onderscheiden naar vier aspecten: (1) de technische prestaties, (2) de mens-machine-interactie, (3) het rijgedrag en (4) het gedrag van de verkeersstroom. Elk van de 20 telematicasystemen kan in termen van deze vier effecten worden geëvalueerd op de bijdrage aan (on)veiligheid. Bij de literatuurverkenning is gezocht naar informatie over de specifieke combinatie van systeem en mogelijkheid (on)veiligheidseffect. Daarbij werd bovendien in kaart gebracht op basis van welk type onderzoek de uitspraken over bijdrage aan veiligheid werden gedaan.

De resultaten waren in een aantal opzichten verrassend. Waar de technologische ontwikkeling vaak wordt gemotiveerd met het argument dat toepassing ervan de veiligheid zal verhogen, blijkt de empirische basis onder veel van die uitspraken zwak. Nogal eens wordt teruggevallen op theoretische veronderstellingen, soms op laboratoriumexperimenten of computersimulaties. In een beperkt aantal gevallen is onderzoek in de realiteit gedaan door middel van experimenten. Het meest zeker blijken de effecten van systemen voor dynamisch verkeersmanagement (toeritdosering, snelheidsregulering, strooktoewijzing). Veel onzekerder zijn systemen voor ondersteuning van bestuurderstaken, het type systemen waarnaar in de Delphi is gevraagd. Onder andere wordt in dit verband het compenserend gedrag van de automobilist genoemd en het mogelijk ver-

lies aan vaardigheden bij het overnemen van rijtaken door geautomatiseerde systemen. Aan de kant van de technologie wordt vooral de relevantie van de parameterinstelling en de kans op falen van de technologie genoemd, mogelijk als gevolg van interferentie-effecten tussen verschillende systemen. Ter illustratie van dit laatste probleem wordt verwezen naar recente problemen met Intelligent Cruise Control-systemen, die de oorzaak lijken van enkele ernstige ongevallen. Denk bijvoorbeeld aan het Interliner-incident in Eindhoven.

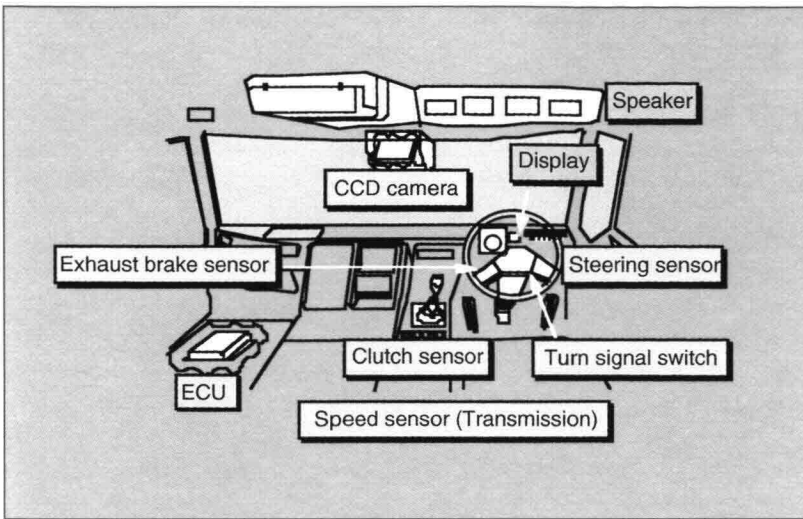
KORTOM: uit de studie bleek een veel grotere onzekerheid over de bijdrage aan de reductie van ongevalskansen dan in het algemeen wordt gesteld. Dat is uiteraard rechtstreeks van belang voor de regelingen voor schuld en aansprakelijk bij ongevallen, waarbij dit type technologie in het geding is. Toch wordt naar deze relatie weinig onderzoek gedaan. In het kader van het TRAIL-programma over technologieverkenning AVG is daarom in 1996 een onderzoeker gestart met het in kaart brengen van deze thematiek (Van Wees, 1997).

Als er met een nieuwe bestuurder-ondersteunende technologie wordt gereden en er ontstaat een ongeval kunnen daar verschillende oorzaken aan ten grondslag liggen, waaronder het geheel of gedeeltelijk falen van het technisch systeem. In het kader van de Delphi-studie werd in dat verband gesproken over onbetrouwbaarheid en gebrek aan nauwkeurigheid. In de sfeer van regelgeving kunnen met betrekking tot veiligheid verschillende invalshoeken aan de orde zijn. In de eerste plaats valt te denken aan de preventieve toelatingseisen. Daarnaast kan vooral de regeling der productaansprakelijkheid, waarbij de producent achteraf ter verantwoording kan worden geroepen, een belangrijke rol spelen.

De preventieve toelatingseisen beogen te voorkomen dat ondeugdelijke voertuigen in het verkeer worden gebracht. Voertuigen, onderdelen en technische systemen moeten daarom aan een groot aantal technische voorschriften voldoen alvorens deze op de markt kunnen worden geïntroduceerd. Deze voorschriften komen veelal in internationaal verband tot stand, waarbij vooral Europese richtlijnen een belangrijke rol spelen. Naast de preventieve eisen in het kader van de toelating tot de weg zal ook de regeling der productaansprakelijkheid een stimulerende rol kunnen spelen met betrekking tot de veiligheid van bestuurder ondersteunende technologie. Producenten zijn aansprakelijk voor door hen in het verkeer gebrachte gebrekkige producten. Een product is volgens de wet gebrekkig indien het niet de veiligheid biedt die men daarvan mag verwachten, alle omstandigheden in aanmerking genomen. Hoewel deze aansprakelijkheid in de eerste plaats gericht is op het vergoeden van schade zal de dreiging ervan het preventieve veiligheidsbeleid van fabrikanten stimuleren.

De producent kan zich bijvoorbeeld niet zonder meer tegen aansprakelijkheid verweren door er op te wijzen dat het voertuig of technisch systeem aan alle wettelijke vereisten voldoet. Immers bij de beoordeling van de gebrekkigheid in het kader van de productaansprakelijkheid worden alle omstandigheden in aanmerking genomen, waarbij de concrete omstandigheden van het geval een strengere norm dan de wettelijk vastgelegde kunnen rechtvaardigen. Dergelijke concrete omstandigheden kunnen bijvoorbeeld zijn gelegen in de wijze waarop het product wordt gepresenteerd (veiligheid als selling point); de mate en de wijze waarop de consument voor de aan het gebruik van het product verbonden risico's wordt gewaarschuwd; de veiligheid van soortgelijke producten (in dezelfde prijsklasse) op de markt; of het feit dat de wettelijke vereisten gebaseerd zijn op verouderde technische inzichten.

Bij de introductie van een vernieuwende technologie als bestuurder ondersteunende



© Mitsubishi Motors Corporation, Japan

Dashboard-inrichting zoals ontwerpers bij Mitsubishi Motors zich die voorstellen.

systemen doen zich in dit verband nog een aantal bijzonderheden voor. Zo kan het voldoen aan de wettelijke eisen in beginsel slechts relevant zijn voor de beoordeling van de veiligheid die een gebruiker mag verwachten indien het gebrek waarop de benadeelde zich beroept geacht kan worden bij de totstandkoming van de norm door de wetgever te zijn afgewogen en aanvaardbaar geoordeeld. De bijzondere, door de nieuwe bestuurder ondersteunende technologie in het leven geroepen veiligheidsaspecten, met name op het gebied van mens-machine interactie, zijn vanzelfsprekend bij de vaststelling van de bestaande voertuigeisen niet in beschouwing genomen. In normerende zin kan de rechter dan terugvallen op het criterium van de gerechtvaardigde veiligheidsverwachting van de consument.

Een ander belangrijk punt is het gebrek aan ervaring met het daadwerkelijk gebruik van dergelijke systemen. Er is zodoende nog geen sprake van een gevestigde publieksverwachting omtrent het veiligheidsniveau. Gesteld kan worden dat de rechter, gevraagd naar zijn oordeel omtrent de gebrekkigheid, bij een dergelijk innovatief product een grotere beoordelingsvrijheid heeft dan bij reeds lang op de markt zijnde producten. Het ontbreekt de consument immers aan een op ervaring gebaseerde verwachting omtrent de risico's van het gebruik. Het eventuele oordeel van de rechter kan daarbij van groot gewicht zijn voor de toekomstige ontwerpbeslissingen van producenten.

Producenten zullen niet kunnen vermijden dat ze geconfronteerd worden met claims. De vraag is echter in hoeverre deze aanspraken zullen worden gehonoreerd en in welke mate aansprakelijkheid voor verkeersongevallen op fabrikanten zal komen te rusten. Er zal meer en meer een verschuiving in het dragen van de kosten van verkeersschade kunnen optreden van de automobilist (feitelijk de assuradeuren) richting fabrikanten (als het gaat om zogenaamde in-car systemen die los van de infrastructuur functioneren) of een combinatie van fabrikanten en wegbeheerders (als het gaat om een automatische piloot, die werkt op basis van een mix van intelligente voertuigen en intelligente infrastructuur). De aansprakelijkheidsrisico's kunnen voor producenten en mogelijk ook wegbeheerders zo zwaar gaan wegen dat dit vraagstuk een belemmering vormt voor de introductie van bepaalde, vooral meer ingrijpende vormen van AVG.

Een laatste type van onzekerheid waaraan in dit artikel aandacht wordt besteed, is de problematiek van acceptatie door weggebruikers van technische systemen die ingrijpen op de individuele vrijheid. Een dergelijk systeem is de zogenoemde ISA (Intelligente Snelheids Adapter). Het betreft hier een in het voertuig aangebrachte technologie, die in bepaalde wegsituaties de snelheid van het voertuig daadwerkelijk beperkt (autonoom ingrijpende systemen) of poogt te beperken door waarschuwingen te geven aan de bestuurder (bijvoorbeeld grotere tegendruk op het gaspedaal, geluid- of lichtsignalen). De beperking geldt dan tot de lokaal geldende snelheidslimiet en de signalen daartoe worden bijvoorbeeld opgevangen vanuit de infrastructuur. Technologie voor (autonome) beperking van de snelheid is van evident belang voor de ontwikkeling richting automatisch geleide voertuigen. Ook op korte termijn is er echter eveneens sprake van relevantie, omdat de snelheidsoverschrijding in het algemeen in het wegverkeer omvangrijk is op alle wegtypen. Het gevolg daarvan is een hogere ongevalskans en grotere effecten van ongevallen. Denk bijvoorbeeld aan de regelmatig optredende mistongevallen, waarin te hoge snelheden een grote rol blijken te spelen. Anders gezegd: de invoering van ISA zou een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan minder onveiligheid in het wegverkeer (Alink, 1992). Dit is de reden geweest voor het Ministerie van Verkeer en Waterstaat om de invoering van ISA serieus als beleidsmaatregel te overwegen en een proefproject te starten in Tilburg (Van Uden, 1997).

Zoals gesteld is de mate van overschrijding van snelheidslimieten groot: afhankelijk van het wegtype en de mate van controle soms enkele tientallen procenten van het aantal voertuigbewegingen. Beïnvloeding van de snelheid door middel van ISA, vooral als er sprake is van autonoom ingrijpen, moet dus in belangrijke mate ervaren worden als ingrijpen in de individuele vrijheid van de automobilist. Invoering van ISA op grote schaal zal dus naar verwachting op weerstanden kunnen stuiten en ontwijkgedrag kunnen veroorzaken. Deze overwegingen waren de belangrijkste reden voor de auteurs om in samenwerking met de Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid (SWOV) in 1997 een draagvlakonderzoek te starten naar de mogelijke invoering van ISA. Het onderzoek, dat overigens los staat van het experiment in Tilburg, heeft inmiddels een eerste rapport opgeleverd (Timmermans en Molin, 1998).

Het draagvlakonderzoek is gebaseerd op een uitgebreide schriftelijke enquête die in het voorjaar van 1997 naar bijna 1500 personen ouder dan 18 jaar werd gezonden. Hiervan werden 442 ingevulde en voor analyse bruikbare enquêtes terug ontvangen (30% respons). De responsgroep bleek niet op alle achtergrondkenmerken (zoals sekse, leeftijd, autobezit) geheel representatief. Niettemin leverde de meting een hoop belangwekkende gegevens op. Omdat ook deze studie veel omvangrijker is dan hier kan worden beschreven, wordt volstaan met het noemen van enkele interessante resultaten van de uitgevoerde analyses.

■ Van de respondenten geeft 30-45% toe dat zij soms tot vaak de geldende snelheidslimiet op een bepaald wegtype overschrijden. Dit gebeurt het minst in 30 km-gebieden en steeds vaker naarmate de weg van een hogere orde is en scheiding van langzaam en snel verkeer plaatsvindt. Tegelijkertijd voelt 70% van de ondervraagden zich als (brom)fietser of als voetganger (50%) onveilig in het verkeer. Van de automobilisten voelt een kwart zich onveilig. Driekwart van de respondenten noemt te hard rijden een belangrijke oorzaak van ongevallen.

■ Gelet op het verkeersgedrag en de veiligheidsbeleving op de weg, is het logisch dat er veel steun is voor beleid gericht op handhaving van de snelheidslimiet. Bijna iedereen vindt dit (zeer) belangrijk voor de woonerven, 30 km- en 50 km-zones. De steun neemt echter snel af voor wegtypen van een hogere orde, tot 40% waar het gaat om autosnelwegen. Driekwart van de respondenten is vervolgens van mening dat ISA een bijdrage kan leveren aan limiet-handhavend beleid. Een meerderheid (60%) van

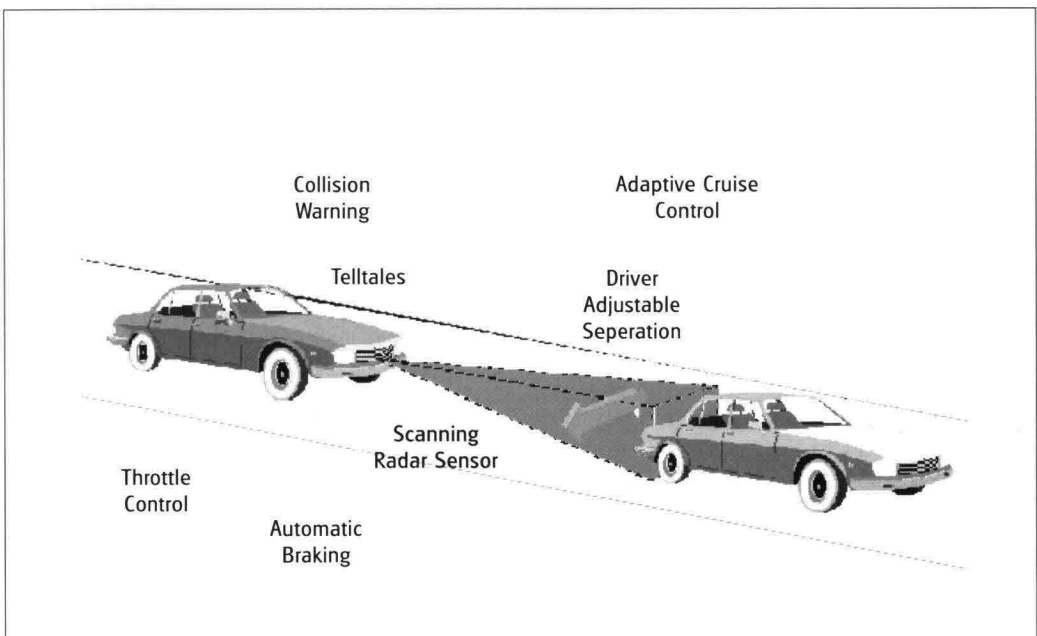
de ondervraagden heeft dan ook een voorkeur voor invoering van ISA boven verder op grote schaal aanpassen van infrastructuur in combinatie met verscherping van politie-toezicht.

■ Uitgaande van invoering van een ISA, is de respondenten gevraagd naar hun voorkeur voor de functionaliteit: automatisch begrenzend of waarschuwend/adviserend. Voor wegen in de directe woonomgeving kiest tweederde van de respondenten voor begrenzing. Naarmate wegen van een hogere orde zijn, daalt deze voorkeur tot 25% op autosnelwegen. Driekwart van de respondenten kiest dan voor een slechts waarschuwend ISA. Dit geldt voor normale omstandigheden. Maar liefst 80% van de respondenten heeft geen bezwaar tegen een automatische begrenzing in bijzondere omstandigheden, zoals wegwerkzaamheden of (zeer) slecht weer.

■ Mochten autobezitters de vrije keuze hebben om een ISA aan te schaffen, dan blijkt slechts 20% van hen zeker niet een dergelijk systeem aan te willen schaffen, ook al zou die volgens de voorkeursinstelling werken (inclusief de begrenzing onder bijzondere omstandigheden). De helft van de respondenten zou zo'n systeem zeker wél aanschaffen. De categorie 'zeker wel' neemt af naar ruim 10%, als het zou gaan om een overall begrenzend ISA. De bereidheid tot vrijwillige aanschaf is overigens ook sterk afhankelijk van de te betalen prijs. Als ISA gratis wordt meegeleverd in nieuwe voertuigen, is de steun groot. Bij een prijs van rond de f 500,- ligt de bereidheid al lager dan 10%.

■ De vraag naar al dan niet verplichtstelling is uiteraard ook gesteld. Bijna driekwart van de respondenten steunt een verplichte ISA, mits deze functioneel overeenkomt met de eigen voorkeuren voor de mix van begrenzen en waarschuwen; de rest twijfelt of noemt het een slechte gedachte. Meer dan de helft vindt een verplichte, overall begrenzend ISA een (zeer) slecht idee.

■ Sluist: over het geheel blijken vrouwen, lager opgeleiden, ouderen, niet-autobezitters en minder frequente autogebruikers positiever te staan tegenover ISA. De verschillen zijn echter niet groot, waarmee het vraagstuk van representativiteit minder relevant lijkt.



Om zich optimaal te kunnen verplaatsen, zal de chauffeur binnen enkele jaren worden bijgestaan door nieuwe elektro-mechanische hulpmiddelen.

Samenvattend blijkt uit dit onderzoek dat er een zeker draagvlak lijkt te bestaan voor een technologie als ISA, maar dat dit draagvlak sterk afhankelijk is van de mate waarin wordt aangesloten op de eigen voorkeuren voor ondersteuning, waarbij recht wordt gedaan aan de eigen verantwoordelijkheid en professionele taxatie als bestuurder van wegsituaties. Een systeem dat functioneel als steun wordt ervaren, vindt veel meer acceptatie dan een systeem dat ervaren wordt als aantasting van individuele vrijheid. Deze lijn doortrekkend naar de technische systemen die in de Delphi-studie werden benoemd, mag dan ook veel meer steun worden verwacht voor ondersteunende, assisterende, systemen dan voor een systeem als de automatische piloot. Dit laatste immers neemt alle bestuurderstaken (althans op bepaalde wegtypes) over en beperkt daarmee de vrijheid sterk.

TENSLLOTTE Op de automatische piloot door de Randstad? Voor technici een fijne uitdaging, voor sommige beleidsmakers dé oplossing voor verkeersproblemen, voor fabrikanten een risicovolle onderneming, voor veel gebruikers voorlopig een stap te ver. In het voorgaande benadrukten we de grote onzekerheden die rond de verdere ontwikkeling en toepassing van deze technologie bestaan. We illustreerden een deel van die onzekerheden met resultaten van recent onderzoek: de techniek is nog lang niet perfect, de effecten op menselijk- en verkeersstroomgedrag zijn nog grotendeels onbekend, de institutionele randvoorwaarden nog goeddeels oningevuld en steun van gebruikers is er slechts als het de individuele vrijheid maar niet dwarsboomt.

Dit beeld roept niet op tot stilzitten. Integendeel, het onderstreept de noodzaak van verder onderzoek op vele terreinen, zowel technisch als maatschappelijk. Het eerdergenoemde Business Plan AVG geeft hiertoe een goede aanzet; het succes ervan zal afhangen van de middelen die beschikbaar komen voor onderzoek en hoe die middelen worden ingezet. Sterker dan ooit klinkt de laatste jaren de roep om bundeling en versterking van expertise op het terrein van verkeers- en vervoersonderzoek. Het binnen de Onderzoeksschool TRAIL en bij TNO in uitvoering zijnde onderzoek op dit terrein kan daarbij als kristallisatiepunt dienen.

REFERENTIES

- Alink, G.M.M. (1992): Snelheidsbegrenzer als beleidsinstrument, *Verkeerskunde*, jrg. 43, nr. 3, pp. 22-24
- Banister, D. (1994): *Transport planning in de UK, USA and Europe*, E&FN Spon, Lonon
- Bruijn, J.A. de, P. de Jong, A.A.A. Korsten en W.P.C. van Zanten (red.) (1996): *Grote projecten; besluitvorming & management*, Samsom H.D. Tjeenk Willink, Alphen a.d. Rijn
- Bovy, P. en M. Minderhoud (1996): *Telematica en IT in het verkeer*, *Informatie en Informatiebeleid*, jrg. 14, nr. 2, pp. 31-39
- Das, R. en R. Das (1992): *Wegen naar de toekomst*, Tirion, Baarn
- Hall, R.W. en H.S. Tsao (1994): *AHS Development: a preliminary assessment of uncertainties*, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley
- Heijden, R.E.C.M. van der (1996): *Planning large infrastructure projects: seeking a new balance between engineering and societal support*, *DISP: Dokumente und Informationen zur Schweizerischen Orts-, Regional- und Landesplanung*, jrg. 32, nr. 125, pp. 18-25
- Heijden, R.E.C.M. van der en V.A.W.J. Marchau (1996): *Automatische voertuigbesturing in het wegverkeer*, *Informatie en Informatiebeleid*, jrg. 14, nr. 2, pp. 41-46
- Hoedemaecker, M., M.M. Minderhoud en M. Wiethoff (1966): *Heeft automatische voertuigbesturing de toekomst?*, *Verkeerskunde*, jrg. 47, n. 12, pp. 32-35
- Levine, J. en S.E. Underwood (1996): *A multiattribute analysis of goals for intelligent transportation system planning*, *Transportation Research-C*, vol. 4, pp. 97-111
- Marchau, V.A.W.J. en R.E.C.M. van der Heijden (1997a): *Knowledge of safety impacts of transport telematics in road traffic*, *Proceedings 3rd TRAIL Year Congress 1997: New times and innovative solutions offered*, TRAIL-studies nr. S-97/2, Delft, pp. 6.1-6.12
- Marchau, V.A.W.J. en R.E.C.M. van der Heijden (1997b): *Expert opinions on future developments of driver support systems: results of an international Delphi study*, TRAIL Onderzoekschool, Delft, december
- Shladover, S.E. (1995): *Review of the state of development of advanced vehicle control systems (AVCS)*, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 24, no. 6-7, July 1995 pp. 551-595
- Timmermans, L. en E.J. Molin (1998): *De snelheid begrensd; een onderzoek naar het draagvlak voor de intelligente snelheidsadapter voor personenauto's*, TU Delft/SWOV, Delft/Leidschendam, januari
- Uden, J. van (1997): *Intelligente snelheidsadaptatie in Tilburg*, *Verkeerskunde*, jrg. 48, nr. 6, pp. 42-45
- Underwood, S.E. (1990): *Automated highway/intelligent vehicle systems: technology and socio-economic aspects*, Report 901505, Society of Automotive Engineers, Warrendale, USA
- Veer, P.W. van der, P.H.W.M. Oude Luttighuis, G. Eggens en G.J.C. Nolthuis (1995): *Informatietechnologie in verkeer en vervoer*, Stichting Telematica Research Centrum, Enschede
- Wees, K.A.P.C. van (1997): *Liability aspects of driver support systems*, in 3rd TRAIL Year Congress and Knowledge market, 12 blz. Den Haag, October, 1997
- Wees, K.A.P.C. van , *Advanced vehicle control systems: safety and legislation*. In: 31th ISATA, automotive Ergonomics and Safety, pp 19-26. 98SAF009. ISATA Düsseldorf, Germany, 2-5 June 1998. Editor: D. Roller; Institut für Informatik Universität Stuttgart, published by ISATA, Croydon, England, 1998.

NIET BRUGGEN BOUWEN,
MAAR ZELF **BRUG** ZIJN

**Nieuwe, bestuurskundige hulpmiddelen
voor de besluitvorming**

10
B. Enserink
M.P.M. van der Ploeg
W.A.H. Thissen
G.J. de Vreede

• • •

Soms pakt besluitvorming verkeerd uit. Bij de carpoolstrook, de ontpoldering van gebieden langs de Westerschelde en de watersysteemverkenningen liep Rijkswaterstaat tegen uiteenlopende problemen aan. Rijkswaterstaat heeft ervan geleerd en kiest inmiddels voor een opener benadering, de betrokken partijen (actoren) worden nu eerder betrokken bij de beleidsvoorbereiding. Maar welke procesaanpak is de beste in welke situatie? En: kan de technologie helpen? In dit hoofdstuk worden drie methoden beschreven die bij de Delftse subfaculteit Technische Bestuurskunde zijn ontwikkeld voor probleemoplossingen en participatieve besluitvorming. Nieuwe TB-ingenieurs bouwen geen bruggen, maar zijn zelf de brug.

• • •

Strategische besluitvorming op het terrein van de Rijkswaterstaat loopt niet altijd op rolletjes. Wie herinnert zich niet het fiasco met de carpoolstrook bij Amsterdam? Of de problemen waartegen de Rijkswaterstaat in Zeeland is aangelopen? Na uitgebreide analyse was voor de RWS duidelijk dat gedeeltelijke ontpoldering langs de Westerschelde zou kunnen bijdragen aan zowel natuurherstel als veiligheid. Men had echter niet gerekend op de gevoelens en het daaruit voortvloeiende verzet van de lokale bevolking, als gevolg waarvan de besluitvorming nu al lange tijd stil ligt.

En hoe zit het met de watersysteemverkenningen? De resultaten van ingewikkelde en dure modelstudies over de Nederlandse watersystemen zijn in het kader van de beleidsvorming over de vierde nota Waterhuishouding maar lauwtejes door de besluitvormers ontvangen - terwijl de systeemanalytische aanpak toch de laatste decennia de basis was voor het waterhuishoudkundig beleid in Nederland.

Al deze - en vele andere - voorbeelden wijzen op de noodzaak beleidsvorming op een andere manier aan te pakken. Dat RWS dit signaal heeft begrepen, blijkt uit diverse initiatieven (zoals 'Infralab' en 'Wegverlichting') in de richting van een meer open benadering, samen met de betrokken actoren. In publicaties over het 200-jarig bestaan van RWS wordt de in de laatste decennia gemaakte omslag sterk benadrukt. Betekent dit nu dat alle problemen zijn opgelost?

Helaas niet. We staan nog slechts aan het begin van een leerproces. Welke procesaanpak past in welke situatie? Zijn aanpassingen nodig in het soort analyses dat moeten worden gemaakt? Kan de technologie helpen?

In dit artikel wordt - na een korte historische schets - ingegaan op enkele nieuwe ontwikkelingen.

BELEIDSANALYSE: EEN KORTE GESCHIEDENIS

De beleidsanalyse is ontstaan uit behoefte aan een rationele aanpak van complexe beleidsproblemen. De oorspronkelijke gedachte was doelstellingen - zoals droge voeten of een soepele verkeersafwikkeling - vast te stellen, en vervolgens met behulp van beschikbare kennis uit te zoeken op welke manier die doelen het beste bereikt kunnen worden. Die analyse moest objectief en wetenschappelijk zijn. Subjectieve afwegingen zouden gescheiden blijven van objectieve kennis en feiten. De afwegingen zijn immers aan de beslissers. De analisten dienden zich daarom vooral te richten op effectief gebruik van beschikbare kennis en informatie, door toepassing van systeemanalyse en modellering.

Dat vanuit deze filosofie vooral het te beïnvloeden of te besturen (fysiek of technisch-maatschappelijk) systeem centraal stond, ligt voor de hand. Voor Rijkswaterstaat betekende dit bijvoorbeeld beleidsanalytische modellering van watersystemen en verkeers- en vervoerssystemen. Door samenwerking met de Amerikaanse RAND Corporation in de jaren zeventig heeft Rijkswaterstaat op dit gebied in Nederland een voortrekkersrol vervuld. Beleidsanalyses voor de Oosterschelde-problematiek en de PAWN-studie voor de tweede nota Waterhuishouding gelden ook internationaal nog steeds als zeer geslaagde voorbeelden van de systeemanalytische aanpak.

De systeemanalytische benadering moge de traditioneel denkende ingenieur zeer aanspreken, in de praktijk loopt besluitvorming meestal niet volgens het rationele model. Persoonlijke visies en relaties, toevalligheden, strategische allianties, machtsverhoudingen, koppeling aan totaal andere beleidsvraagstukken, spelen een zeker zo belangrijke rol. Partijen met een belang proberen voortdurend de discussie te beïnvloeden in een voor hen zelf gunstige richting, óók nadat een besluit is genomen. De grens tussen objectieve kennis en subjectieve waarden is doorgaans moeilijk te trekken. Bestuurskundigen zien beleidsvorming dan ook primair als een proces van strategisch onderhandelen tussen mensen of partijen.

NAAR EEN PARTICIPATIEVE AANPAK

De participatieve beleidsanalyse is ontstaan als reactie op de problemen met de traditionele benadering. Uitgangspunt is dat het overleg tussen de actoren die belang en/of invloed hebben bij de oplossing van een probleem, centraal staat. Soms gaat het daarbij alleen om de overheid. Meestal zijn veel meer partijen betrokken, al was het maar omdat uitvoering van besluiten niet mogelijk is zonder hun medewerking.

De beleidsanalyse zal zich dus niet alleen op het technische water, infrastructuur- of verkeerssysteem moeten richten, maar ook en vooral op de gezichtspunten en belangen van de daarbij betrokken actoren. Dat kan het beste door die actoren bij de analyse te betrekken. Dit biedt een aantal voordelen:

- Vergroting van kennis en creativiteit: vanuit verschillende gezichtspunten worden visies en ideeën ingebracht. Discussie tussen betrokkenen kan leiden tot nieuwe, vruchtbare ideeën in alle stadia van het proces

- Betere acceptatie en meer draagvlak: als belangengroepen de ruimte krijgen om samen het probleem te formuleren, eigen ideeën en visies in te brengen, en zien

In de praktijk loopt de besluitvorming meestal niet volgens het rationele model.



Elektronisch vergaderen versnelt de interactie tussen de deelnemers en levert daardoor in korte tijd meer inzicht in de problematiek op en ook meer ideeën.

dat eigen belangen meewegen in de evaluatie van oplossingen, kan dat leiden tot meer draagvlak voor de uiteindelijke beslissing

- Voorkomen van blokkades achteraf: als partijen die noodzakelijk zijn voor uitvoering ('realisatiemacht' in het bestuurskundige jargon) of die uitvoering kunnen blokkeren ('hindermacht') er vroegtijdig bij worden betrokken, kan dat veel problemen in latere stadia voorkomen. Alternatieven kunnen eventueel vroegtijdig worden aangepast, of er kan aan compensatieregelingen of andere afspraken worden gewerkt, voordat het proces geheel vastloopt.

De problemen die in de inleiding werden geschetst, hadden waarschijnlijk voorkomen kunnen worden door vroegtijdige betrokkenheid van actoren: de ongedisciplineerde, dwarsliggende automobilist bij de carpoolstrook, de lokale bevolking in Zeeland, het inmiddels meer op overleg gerichte bestuurlijke circuit bij de watersysteemverkenningen.

De participatieve beleidsanalyse wijkt op enkele principiële punten af van de traditionele, systeemanalytische aanpak:

- De scheiding tussen 'objectieve' analyse van de beleidsinhoud enerzijds en overleg en onderhandeling anderzijds, vervaagt of verdwijnt geheel

- De analyse richt zich niet meer primair op het zoeken naar een 'optimale' manier om gegeven doelen te bereiken, maar op het ondersteunen van het leren en onderhandelen van betrokken actoren. Kennis over het systeem blijft (natuurlijk) belangrijk, maar welke kennis nodig is, hangt vooral af van de behoeften en inzichten van de actoren, en van de mogelijkheden om met behulp van die kennis oplossingen te vinden waarmee een ieder kan instemmen

- De rol van de beleidsanalist verschuift van technisch-wetenschappelijk naar katalytisch

- Problemen en doelen zijn niet vooraf gegeven en vaststaand, maar onderwerp

van overleg en onderhandeling, en kunnen in de loop van het proces veranderen

■ Verschillende partijen zullen het probleem anders zien en aan andere aspecten waarde hechten. De systeemanalytische inbreng zal recht moeten doen aan die verschillen. Het is niet vanzelfsprekend dat één 'objectief-wetenschappelijk' model voldoet, of per definitie acceptabel is voor alle actoren.

Terwijl deze aanpak beter aansluit bij beleidsvorming in de praktijk, roept hij ook nieuwe vragen op. Welke partijen moeten in welke fase van een beleidsproces worden betrokken en met welk doel? Als andere partijen meedoen, zullen problemen immers anders gedefinieerd worden en er andere oplossingen uit de bus komen. Hoe kan men snel inzicht krijgen in de problematiek en de variatiemogelijkheden daarin, zowel inhoudelijk als qua betrokken actoren? Hoe moet systeemmodellering worden aangepast om problemen vanuit verschillende perspectieven te kunnen schetsen en analyseren? Welke hulpmiddelen zijn geschikt voor ondersteuning van participatieve processen? Op deze plaats wordt kort ingegaan op drie bijdragen op dit gebied van de Delftse sub-faculteit Technische Bestuurskunde.

EEN QUICK SCAN-METHODE VOOR PROBLEEMVERKENNING De vroegste stadia van het beleidsproces en de beleidsanalyse zijn gericht op probleemformulering, probleem-afbakening en verkenning van de oplossingsruimte. Snel inzicht te verwerven in niet alleen de technische, maar ook de sociale en maatschappelijke complexiteit van het probleem, is belangrijk voor alle betrokkenen, zeker voor partijen - zoals Rijkswaterstaat - die ook een procesverantwoordelijkheid hebben. Hierop gerichte methoden staan bekend als rapid appraisal - of quick scan-methodieken.

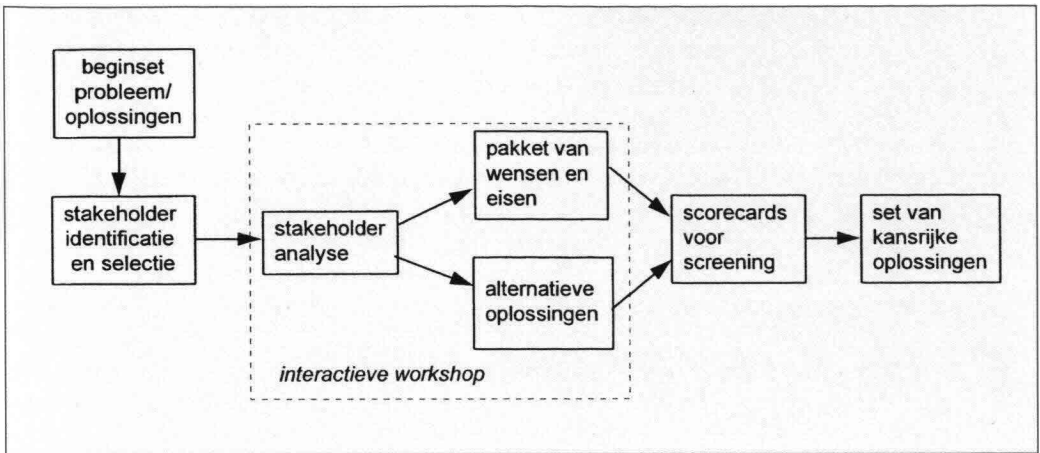
In opdracht van het Delftse Centrum Ondergronds Bouwen (COB) is een participatieve quick scan ontworpen. De methode is gericht op besluitvorming over grote infrastructu-
rele werken. Doel is om in een vroeg stadium een breed scala aan oplossingen te inventariseren, waarvan de meestbelovende in een vervolgstap nader worden onderzocht. Daarmee kan worden voorkomen dat oplossingen die later toch interessant lijken te worden, in een vroeg stadium over het hoofd worden gezien doordat te beperkt, bijvoorbeeld alleen op aanlegkosten, wordt geselecteerd. Het COB hoopt dat op deze manier ook ondergrondse oplossingen - waar dat relevant lijkt - vanaf het begin als volwaardig meegenomen worden.

De gekozen participatieve benadering vraagt om directe betrokkenheid van initiatiefne-
mer en maatschappelijke actoren en om directe interactie tussen de belanghebbenden. Hierdoor is wederzijds leren mogelijk. De resultaten van de quick scan zijn:

- een pakket van wensen en eisen
- een groot aantal (ruimtelijke) alternatieven met ruime variatie
- een of meer scorecards voor multi-criteria-analyse
- een selectie van de kansrijke alternatieven

Door het betrekken van belanghebbenden bij het proces, krijgen opdrachtgever, analist en betrokkenen inzicht in de verschillen in probleempcepties en de wensen en ideeën over mogelijke oplossingen. Informatie over de verdeling van de lusten en las-
ten van oplossingen en mogelijke invloed op realisatie ('hindermacht'), kan worden gebruikt bij het ontwerpen van een vervolproces.

Een eerste belangrijke vraag is: Wie is belanghebbend? Welke actoren moeten en willen worden betrokken in welke fase van de beleidsvoorbereiding? Wij gaan daarbij uit van de beslismomenten zoals die zijn vastgelegd in de regels voor ruimtelijke ingrepen. Bij



FIGUUR:1 Stappen en resultaten bij de ontworpen quick scan.

elk besluismoment kunnen verschillende belanghebbenden of **stakeholders** betrokken zijn. Het moment zelf, de geldende regels en de inhoud van de te nemen beslissing bepalen hun betrokkenheid. Om tot een (beperkte) selectie te komen van mogelijk relevante actoren, worden drie invalshoeken gehanteerd:

- De ruimtelijke schaal: MER-plichtige projecten worden als grootschalig en lokale verkeersvoorzieningen als kleinschalig beschouwd
- De inhoud van het ontwerp-proces en uitvoeringsaspecten: welke soorten kennis zijn nodig, welke partijen zijn betrokken bij de realisatie?
- De geldende regels (bijvoorbeeld wettelijke voorschriften), fysieke omstandigheden (bijvoorbeeld: Wie is direct omwonend, ondervindt hinder) en financieringswijze (wie betaalt?).

AANPAK QUICK SCAN De quick scan-methode is als volgt uitgewerkt, zie ook figuur 1:

- In samenspraak met de initiatiefnemer wordt een eerste probleemformulering opgesteld en een inventarisatie van primaire oplossingen gemaakt
- Een selectie van de actoren die potentieel bij het probleem betrokken zijn, wordt uitgenodigd voor deelname aan workshops (de stakeholderselectie)
- Tijdens interactieve workshops wordt onderzocht hoe stakeholders denken over het probleem, welke wensen zij hebben, welke middelen zij kunnen inzetten en welke eisen zij stellen aan een oplossing van het probleem. Nieuwe oplossingen en aanpassingen die door de stakeholders worden aangedragen, worden geïnventariseerd en uitgewerkt. Resultaten van deze stap (kunnen) zijn: een herformulering en afbakening van het probleem; een pakket van wensen en eisen; een of meer aanvullende of nieuwe alternatieven en identificatie van nieuwe stakeholders
- De alternatieve oplossingen worden gescreend met behulp van een rekenmodel dat de monetaire consequenties doorrekent. Niet-monetariseerbare effecten worden kwalitatief beoordeeld. De resultaten worden weergegeven in een scorecard, waarin de eerder geformuleerde wensen en eisen als criteria terugkeren
- Op basis van de scorecard worden kansrijke oplossingen geselecteerd voor nadere uitwerking in het verdere beleidsproces. Bij deze selectie worden tevens praktijkervaringen betrokken.

Het quick karakter komt tot uiting in de beoogde doorlooptijd: het hele proces moet in een tijdsbestek van enkele maanden afgerond kunnen worden, waarna een goede basis bestaat voor grondiger en/of formelere vervolgstappen.

De geschetste aanpak is getoetst in een aantal korte case-studies, waaronder de planvorming voor spoorverdubbeling te Rijswijk en plan Sytwende te Voorburg en ter beoordeling van tracévarianten voor de Noord-oostelijke verbinding te Delden. De ondergrondse varianten voor ruimtegebruik bleken hierbij soms wel, soms niet kansrijk. De case-studies bevestigden dat de aanpak sneller leidt tot een grotere variatie aan oplossingen. Bijvoorbeeld, in de case Delden werd tijdens de workshops een nieuwe tracévariant langs het Twentekanaal ingebracht en besproken; in het parallel verlopende, echte proces kwam deze pas veel later op tafel.

De beschreven methodiek is stap voor stap uitgewerkt en geïllustreerd in een door het COB uitgebracht handboek.* De methodiek kan meer of minder participatief worden uitgevoerd, waarbij als vuistregel kan worden gehanteerd: 'Hoe groter de verwachte tegenstellingen des te meer participatie.' De methodiek is breed toepasbaar voor allerlei ruimtegebruiksproblemen, zoals de aanleg van lijninfrastructuur, de lokatie van winkel-, opslag- en distributiecentra, parkeer- en recreatievoorzieningen, industrie- en haventerreinen. Kijken wij bijvoorbeeld naar de Zeeuwse ontpolderingsproblematiek, dan zouden bij toepassing van de quick scan de weerstanden tegen ontpoldering in een veel eerder stadium aan het licht zijn gekomen. Dan had wellicht, in plaats van de huidige confrontatie, in samenspraak met de diverse betrokkenen gewerkt kunnen worden aan oplossingen met een breder draagvlak.

SYSTEEMANALYSE VANUIT EEN MULTI-ACTOR-PERSPECTIEF

Stysteemanalyse blijft een belangrijk onderdeel van beleidsanalyse, ook in de participatieve benadering. Maar participatie van actoren stelt andere eisen dan de traditionele aanpak, die is gebaseerd op expert-kennis van het fysieke systeem- en/of kosten-baten-analyses. De aard van de benodigde kennis wordt namelijk bepaald door de behoeften en inzichten van betrokken actoren en de manier waarop zij tegen het systeem aankijken. Natuurlijk blijft de kennis van experts essentieel, maar de ondersteuning moet recht doen aan de verschillende visies van actoren op het systeem. De systeemanalist moet dus een andere bril opzetten; een systeem ziet er anders uit wanneer je door een van de vele brillen kijkt van de gebruikers van dat systeem. Niet de toestand van het systeem of het berekenen van de optimale oplossing staan centraal, maar de belangen van mensen en de vrijheid om de mogelijke baten van het systeem te benutten.

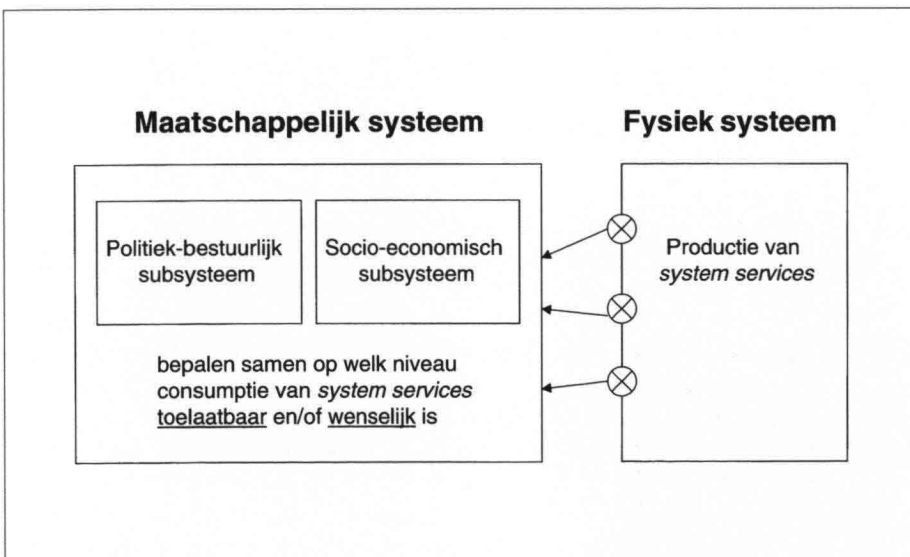
Een systeemanalyse voor participatieve beleidsanalyse richt zich op het soort vragen, die ook in de quick-scan aan de orde zijn:

- Wat is de schade die probleemeigenaren ondervinden? Welke andere actoren ondervinden schade van het probleem, waarom en in welke mate?
- Aan wie wordt de schade doorberekend en hoe? Wat zijn mogelijke baten bij het voortbestaan van het probleem?
- Welke (technische of bestuurlijke) maatregelen kunnen de oorzaak van het probleem wegnemen? Welke maatregelen kunnen de schade beperken? Wat zijn de financiële en maatschappelijke kosten en baten van deze maatregelen? Hoe zijn de lusten en lasten verdeeld?
- Welke actoren kunnen of moeten bijdragen aan deze mogelijke oplossingen? Met andere woorden, hoe is de oplossingscapaciteit verdeeld over actoren? Op basis van welke criteria zullen deze actoren hun voorkeur voor bepaalde oplossingen bepalen? Hoe groot is hun onderhandelingsruimte en waardoor wordt deze bepaald?

- Welke ruimtelijke en tijdsafbakening moet worden gehanteerd bij de probleemformulering? Wat zijn de belangen en oplossingscapaciteit van actoren uit andere regio's of landen en van partijen die het belang van toekomstige generaties behartigen?

HET MAATSCHAPPELIJK SYSTEEM ALS UITGANGSPUNT Wij maken gebruik van een conceptuele modelleertechniek om het fysieke en maatschappelijke systeem in kaart te brengen en deze vragen te beantwoorden (zie figuur 2). Het maatschappelijke systeem staat centraal in de analyse en wordt voorgesteld als twee subsystemen: een socio-economisch subsysteem waarin alle producerende en consumerende activiteiten plaatsvinden en een politiek-bestuurlijk subsysteem voor formele en informele bestuurlijke activiteiten (bijvoorbeeld overleg, wet- of regelgeving). Het maatschappelijke systeem wordt beschouwd als afhankelijk van de toestand van het fysieke systeem. Er zijn verschillende mogelijkheden om deze afhankelijkheid te modelleren. Vaak wordt de stoffenstroom tussen de systemen gemodelleerd, daarmee aangevend dat het maatschappelijke systeem grondstoffen aan het natuurlijke systeem onttrekt en verwerkte grondstoffen loost. Deze methode is zeer geschikt voor het beschrijven van de ecologische gevolgen van vervuiling, maar niet voor het actorgericht in kaart brengen van bijvoorbeeld de gevolgen van grondwateronttrekking, overbelasting van vervoersinfrastructuur of gebruik van ondergrondse ruimte.

Daarom hebben wij gezocht naar een andere manier om de relatie tussen het maatschappelijke en technisch systeem te modelleren. Wij beschouwen de relatie tussen de systemen in termen van goederen en diensten die worden geproduceerd door het fysieke systeem en worden gebruikt door het socio-economische subsysteem. Deze manier van denken is geïnspireerd door het werk van De Groot c.s. (De Groot 1993, Costanza et al. 1997). Hij beschrijft natuurlijke ecosystemen in termen van de productie van *ecosystem services*. Voorbeelden van *ecosystem services* zijn de beschikbaarheid van een visbestand dat commerciële of sportvisserij mogelijk maakt, beschikbaarheid van water



FIGUUR 2: Conceptueel model voor een geïntegreerde systeem-analyse.

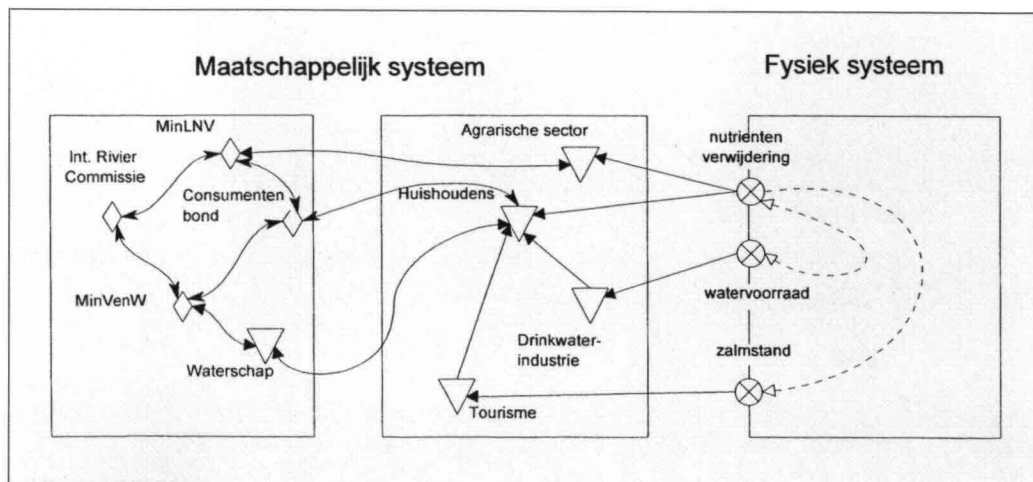
voor gebruik in industrie of voor drinkwaterbereiding, of de beschikbaarheid van diensten zoals biologische stikstofverwijdering of biodiversiteit.

SYSTEM SERVICES ALS INTEGREREND CONCEPT IN SYSTEEMANALYSE Het concept

ecosystem services is verwant aan het concept **gebruiksfunctie** dat wordt gebruikt in waterbeheer (ministerie van Verkeer en Waterstaat, Omgaan met water 1985). Het grote verschil met gebruiksfuncties is dat **ecosystem services** grootheden zijn, die gequantificeerd kunnen worden en waaraan ruimtelijke en tijdsdimensies toegekend kunnen worden. Dit betekent ook dat de relaties tussen **ecosystem services** onderling, eenduidig gedefinieerd en mogelijkheden voor (onderlinge) substitutie gespecificeerd kunnen worden. Het concept **gebruiksfuncties** is gedefinieerd op een hoger aggregatie-niveau en leent zich niet voor de systeemanalytische aanpak. Wij lichten dit toe aan de hand van een concreet voorbeeld: de overbemesting in een rivierstroomgebied (figuur 3).

Bij overbemesting - het woord zegt het al - wordt in feite een te grote aanspraak gemaakt op de capaciteit voor nutriëntenverwijdering in een rivierstroomgebied. Dit resulteert in hoge stikstof- en fosfaatgehalten in het water, die de beschikbaarheid van andere system services nadelig beïnvloeden. In dit voorbeeld is de drinkwaterbereidingssector de probleemeigenaar: de verhoogde nutriëntenconcentraties in het te winnen water betekenen extra risico's en zuiveringskosten. In ons conceptueel model zien wij de drinkwaterindustrie als een consument van een watervoorraad die aan een aantal kwaliteitseisen moet voldoen. De beschikbaarheid van de system service 'watervoorraad' hangt af van de mate waarin een andere service benut wordt, namelijk de service nutriëntenverwijdering. De actoren die de service 'nutriëntenverwijdering' consumeren, in casu huishoudens (of afvalwaterzuiveringsinstallaties) en de agrarische sector in het bovenstroomse gebied, zijn de veroorzakers van het probleem. Deze benadering wijst dus direct op de noodzaak een afweging te maken tussen de mate waarin van de twee services gebruik gemaakt kan worden.

Diverse actoren zijn indirect betrokken bij dit probleem, bijvoorbeeld de toerisme-sector en de huishoudens die afhankelijk zijn van de visstand, bijvoorbeeld voor sportvisserij



FIGUUR 3: Visie op overbemesting in rivierstroomgebied op basis van een conceptuele analyse van gebruikers (consumenten) van de system service "nutriëntenverwijdering".

op zalm. De zalmstand wordt immers ook nadelig beïnvloed door eutrofiëring. Huishoudens zijn in zekere zin op drie manieren betrokken: schade die de drinkwatersector ondervindt, wordt verhaald op de afnemers van het drinkwater; huishoudens profiteren van de (goedkope) afvoerfunctie van nutriënten via de riolering; en zij nemen producten uit de landbouwsector af, die dank zij de nutriëntenlozing tegen een bepaalde prijs worden aangeboden. De diverse actoren in de socio-economische subsysteem vormen een netwerk met de actoren in het politiek-bestuurlijk subsysteem die beschikken over sturingsmiddelen en die belangen behartigen.

Onderhandelingen over de oplossing van het probleem vinden plaats tussen de actoren in het (regionale of interregionale) politieke subsysteem. Coalities met andere gedupeerde actoren kunnen de onderhandelingspositie van de probleemeigenaar verstevigen. Bijvoorbeeld: de toerisme-sector en de drinkwaterindustrie zijn allebei gebaat bij de bestrijding van overbemesting. Samen kunnen zij hun gelijke belangen beter behartigen dan alleen. De huishoudens daarentegen vertegenwoordigen tegenstrijdige belangen: zij moeten de afweging maken tussen hogere prijzen voor afvalwaterzuivering en landbouwproducten enerzijds en drinkwaterkosten en (mogelijk onbekende) gezondheidsrisico's anderzijds.

De actoren in het socio-economische subsysteem implementeren de maatregelen; de lusten en lasten hiervan worden over hen verdeeld. De oplossingscapaciteit ligt in eerste instantie bij de actoren in de agrarische sector en huishoudens. Deze actoren moeten de mate waarin zij gebruik maken van de nutriëntenverwijdering van de rivier beperken, door middel van technische, economische of andere maatregelen. Vergroting van de oplossingscapaciteit kan gezocht worden in technische en/of economische maatregelen die leiden tot een substitutie van de nutriëntenverwijdering van het riversysteem. De drinkwatersector zou bijvoorbeeld kunnen investeren in de agrarische sector op een manier die de zuiveringskosten helpt terugdringen. Uitbreiding van de oplossingscapaciteit kan ook in het politiek-bestuurlijke systeem gezocht worden: door de belangen van bovenstroomse landen of toekomstige generaties mee te nemen in de onderhandelingen, verandert de probleempceptie en daarmee het scala aan substitutiemogelijkheden en de bereidheid tot acceptatie en/of financiering van maatregelen.

Dit voorbeeld laat zien hoe een systeemanalyse op basis van het concept **system services** de aandacht direct richt op actoren en oplossingsrichtingen. In de traditionele aanpak wordt eerst de aandacht op het fysieke systeem gericht, en van daaruit worden alternatieve maatregelen geformuleerd. De betrokken actoren nemen deze informatie al dan niet mee in hun onderhandelingen. De traditionele aanpak biedt weinig mogelijkheden voor een probleemformulering waarin alle zich direct kunnen herkennen. Introductie van het concept **system services** in systeemanalyse, richt zich meteen op de competitie tussen actoren en mogelijke verschuivingen in hun belangen bij uitbreiding van de systeemgrenzen in de ruimte of tijd. Zo'n systeemanalyse biedt meer mogelijkheden voor identificatie van **win-win** situaties in onderhandelingen, en biedt daarmee essentiële informatie voor besluitvorming.

ELEKTRONISCHE ONDERSTEUNING VAN GROEPSPROCESSEN Bij participatieve beleidsanalyse is groepsinteractie erg belangrijk. Participatie kost veel denk- en overleg-tijd en de verschillen in macht, status en sociale vaardigheden kunnen de vrijheid waarmee informatie wordt uitgewisseld, beïnvloeden. Computertechnologie kan hiervoor een oplossing bieden. De effectiviteit van actorparticipatie kan worden vergroot door het

gebruik van zogenaamde electronic meeting systems. Deze technische ondersteuning bestaat uit een netwerk van computers die zijn voorzien van speciale software, een zogenaamd group support system (GSS) of elektronisch vergadersysteem (EVS).

Hoe werkt een elektronisch vergadersysteem? Alle deelnemers voeren hun ideeën en commentaren in via een persoonlijk netwerkstation. De ingevoerde tekst wordt aan een voor alle deelnemers zichtbare lijst of tabel toegevoegd. Deelnemers kunnen in eigen tempo en anoniem werken. Afhankelijk van de vraag of opdracht betekent dit dat deelnemers ideeën formuleren en aan een lijst toevoegen, commentaar leveren op wat anderen hebben ingevoerd, een stemprocedure uitvoeren of een scorecard invullen. Meestal is het wenselijk om de elektronische uitwisseling van informatie aan te vullen met mondeling overleg over de resultaten.

Gebruikers claimen dat EVS-vergaderingen vaak effectiever en efficiënter zijn dan 'gewone' vergaderingen en dat deelnemers een EVS-vergadering tevredener verlaten. Resultaten uit experimenten en praktijkonderzoeken onderschrijven dit (zie bijvoorbeeld Nunamaker et al., 1997). Hiervoor zijn met name de volgende eigenschappen van EVS verantwoordelijk:

- **Parallele discussies:** alle deelnemers kunnen gelijktijdig aan een of meer elektronische discussies deelnemen
- **Opslag gegevens:** alle ingevoerde ideeën en commentaren worden opgeslagen; er gaat geen informatie verloren tijdens discussies en de invoer en de resultaten kunnen na afloop van een sessie mee naar huis worden genomen
- **Anonimiteit:** het is in principe niet mogelijk te herleiden van wie invoer afkomstig is, waardoor er meer gelegenheid is voor vrije meningsuiting en kritiek en minder voor dominant gedrag
- **Focus:** interactie met de computer zorgt ervoor dat de aandacht geconcentreerd blijft op de gestelde vraag en minder gemakkelijk afdwaalt dan in gewone vergaderingen.

EVS wordt meestal tijdens reguliere vergadersituaties toegepast. In principe is EVS echter ook in te zetten bij vergaderingen waaraan deelnemers vanaf verschillende locaties of op verschillende tijdstippen deelnemen. Er zijn bijvoorbeeld EVS-achtige applicaties ontwikkeld voor Internet.

TOEPASSING VAN EVS

Een EVS kan in principe verschillende soorten groepsactiviteiten ondersteunen die belangrijk zijn in participatieve beleidsanalyse: genereren en prioriteren van ideeën, interactieve modelbouw en evaluatie.

Genereren: het identificeren en omschrijven van ideeën en concepten voor de probleemformuleringen en oplossingsrichtingen. De software is geschikt om een groep van 10-25 mensen een groot aantal ideeën te laten genereren in een kort tijdsbestek. Vervolgens worden de ideeën geordend in een aantal categorieën, waarbij overlappende ideeën samengevoegd of verwijderd kunnen worden. Op deze manier wordt maximaal gebruik gemaakt van de kennis en creativiteit die bij de deelnemers aanwezig zijn.

Prioriteren: Rangschikken van gegenereerde ideeën met behulp van diverse stemmethoden, zoals het toekennen van rapportcijfers, ranking, of aangeven van voorkeuren op basis van een Likert-schaal. De combinatie van genereren en prioriteren van ideeën versnelt het proces waarin participanten elkaars percepties op een probleem of oplossingsrichtingen leren kennen. Het resultaat van prioriteren kan als startpunt dienen voor verschillende vervolgv activiteiten. Denk aan het formuleren van een agenda voor verdere discussie of de planning van een vervolgtraject in besluitvorming.

Interactieve modelbouw: een EVS kan gebruikt worden bij interactieve constructie van causale diagrammen als onderdeel van de probleemdefinitie-fase en voor de constructie van een scorecard of impact-matrix voor multi-criteria-analyses. Het is in principe ook mogelijk om participatieve ontwikkeling van simulatiemodellen te ondersteunen, maar de toepassingsmogelijkheden zijn sterk afhankelijk van de beschikbare EVS-software.

Evaluatie: Tenslotte kan een EVS ingezet worden om de evaluatie van alternatieve oplossingen te ondersteunen. Denk hierbij aan het vaststellen van wegingsfactoren voor multi-criteria-analyses en effectschatting (kwalitatief en/of kwantitatief) door expert-panels.

De meeste toepassingen richten zich op probleemverkenning in de vroege fase van een participatief proces. Een EVS is ook een aantal malen met succes gebruikt toen een besluitvormingsproces was vastgelopen en men naar onderwerpen zocht waarop actoren wél overeenstemming konden bereiken. In zulke situaties concentreerde de discussie zich bijvoorbeeld op de afwegingscriteria die men hanteerde in onderhandelingen en op de veronderstellingen die ten grondslag lagen aan de voorkeur voor deze criteria. Mits goed voorbereid, leidt de inzet van EVS tot een effectieve en efficiënte participatie in de vroege stadia van een beleidsanalyse. Het succes is echter niet vooraf te garanderen. In de praktijk blijken de voordelen van een EVS ook risico's in te houden:

- Sommige mensen zullen in een anonieme setting minder snel hun beste ideeën naar voren brengen, omdat zij bang zijn de erkenning ervoor mis te lopen
- Door parallel te communiceren, kan binnen korte tijd zoveel informatie worden gegenereerd dat zowel de deelnemers als de procesbegeleider het overzicht kunnen verliezen
- Vastleggen van alle gegenereerde informatie kan voor groepen onwenselijk zijn, omdat ze werken met gevoelige materie of later 'ongemerkt' hun standpunten willen kunnen wijzigen
- Het karakter van het elektronische systeem leidt tot kort geformuleerde, en daardoor vaak weinig genuanceerde reacties. De discussie kan daardoor als het ware 'platgeslagen' worden.

Zeker in complexe beleidssituaties moet daarom voldoende ruimte en tijd worden genomen om elektronisch opgekomen kernpunten op traditionele manier met elkaar uit te diepen.

Deze verschijnselen zijn in eerste instantie geen gevaren van de technologie zelf, maar van de wijze waarop en het doel waarvoor ze wordt gebruikt. De organisatie, planning en facilitatie van elektronisch vergaderen zijn daarom erg belangrijk, en worden zelfs als een integraal onderdeel van elektronische vergadersystemen of een EVS beschouwd. Voor de beleidsanalist betekent dit dat - net als bij 'gewone' workshops - de voorbereiding en begeleiding van de workshop zorgvuldig moeten worden afgestemd op de situatie en het beoogde resultaat.

De ervaring leert, en RWS-voorbeelden illustreren dit hierna, dat het gebruik van elektronische vergadersystemen de reden waarom groepen samenkomen, verandert. Een EVS biedt actoren niet alleen de mogelijkheid om werk te plannen, maar ook om deze plannen samen uit te voeren. Voorbereiding van elektronische sessies is ook hier van kritisch belang. Inzicht in wat de technologie kan doen is niet voldoende. Een elektronisch vergaderproces moet zodanig worden ontworpen dat de voordelen van het systeem worden gemaximaliseerd en de potentiële risico's herkend en geminimaliseerd. Als een procesbegeleider vooraf en tijdens de sessies het EVS met kennis en kunde

inzet, kan EVS de (creatieve) productiviteit van een groep dramatisch verhogen. De toepassingsmogelijkheden van een EVS zijn echter niet beperkt tot het ontwikkelen en evalueren van beleid. Ondersteuning met EVS kan ook voordelen bieden voor het evalueren van prototypes van computerapplicaties, het identificeren van organisatorische probleemgebieden, het uitvoeren van SWOT-analyses, het ontwikkelen van nieuwe productconcepten, het opzetten en evalueren van projectplanningen of het ontwikkelen van bedrijfsstrategieën.

VOORBEELD: TOEPASSING VAN EEN EVS BIJ 'ONDERHOUDSVRIJE WEGEN'

De kracht van de EVS-technologie kan worden geïllustreerd aan de hand van het gebruik van een EVS in het project 'Wegen naar de Toekomst' van Rijkswaterstaat. Dit project betreft innovatie-projecten die tot doel hebben om een visie op de infrastructuur neer te leggen voor 2027. De werkwijze is interactief: in elke projectgroep werken mensen van specialistische diensten en de hoofddirectie samen. Belanghebbenden, experts en potentiële co-makers worden in diverse sessies bij het proces betrokken. Het EVS werd gebruikt bij de aanvang van het project met als doel de kennis en ideeën te inventariseren bij verschillende organisaties binnen en buiten RWS.

In een bijeenkomst over de huidige gang van zaken bij wegonderhoud werden door 15 deelnemers circa 140 problemen benoemd. Vervolgens werden deze ideeën gegroepeerd tot 53 categorieën van problemen bij wegonderhoud en geprioritiseerd. Het uiteindelijke resultaat was een lijst met de 12 belangrijkste problemen bij wegonderhoud. Al deze groepsactiviteiten vonden plaats in een sessie van één dagdeel. Dit voorbeeld illustreert de mogelijkheden voor tijdsbesparing die EVS biedt bij het vaststellen van een lijst van prioriteiten in probleemverkenning.

Het schoonhouden van ZOAB (zeer open asfaltbeton) werd aangemerkt als één van de 12 topproblemen bij wegonderhoud. In het kader van het pilotproject Spinoza, waarin mogelijkheden voor het toepassen van een spoelsysteem voor het onderhoud van ZOAB worden onderzocht, werden nogmaals twee EVS-sessies georganiseerd. Ditmaal werden experts uitgenodigd. Het resultaat was een inventarisatie van de mogelijkheden voor reinigings- en stromingstechnieken voor het schoonhouden van ZOAB en gedetailleerde uitwerkingen van deze technieken. De technische haalbaarheid van deze technieken werd geëvalueerd door de groep. In totaal werden 100 ideeën uitgewerkt door een groep van 25 experts gedurende een sessie van twee dagdelen. Door toepassing van het EVS werd binnen een kort tijdsbestek maximaal gebruik gemaakt van de kennis en creativiteit van de groep experts.

TENSLOTTE Het is goed mogelijk de drie geschetste methoden in onderlinge samenhang binnen één proces toe te passen. Zie bijvoorbeeld het vraagstuk over het wel of niet ontpolderen van gebieden langs de Westerschelde. De quick scan-benadering had hier toegepast kunnen worden om in een vroeg stadium verschillende mogelijke visies op de toekomst van het gebied, wensen, oplossingsmogelijkheden en potentiële weerstanden daartegen in kaart te brengen. Een elektronisch vergadersysteem zou goed inzetbaar zijn bij een van de in dat kader te organiseren workshops. Voor een nadere systeemanalyse zou de geschetste, van het bestuurlijk en sociaal-economisch systeem uitgaande modelleringswijze een geschikt vertrekpunt kunnen bieden.

In algemene zin betekent de ontwikkeling naar actorgerichte ondersteuning van probleemoplossen dat de rol van de beleidsanalist verandert. Kennis van het fysieke systeem en vaardigheden om een probleem op een systeem-analytische wijze te structureren, blijven belangrijk. Maar deze kennis en vaardigheden moeten worden geïnte-

greerd met kennis van beleidsprocessen en vaardigheden in het organiseren en ondersteunen van interactieve groepsactiviteiten gericht op probleemoplossen.

Technische Bestuurskunde richt zich in haar onderzoek onder andere op het ontwikkelen van methoden voor probleemoplossingen en participatieve besluitvorming. Dit onderzoek wordt verricht in een interdisciplinaire omgeving waarbij experts uit bestuurskunde en technische disciplines zijn betrokken. In de opleiding Technische Bestuurskunde wordt een nieuwe generatie ingenieurs opgeleid die zich deze kennis en vaardigheden eigen maken. De technisch-bestuurskundig ingenieur is daarom uitermate geschikt om processen voor interactieve besluitvorming te ontwerpen en te ondersteunen.

De TB-ingenieur wordt niet opgeleid om bruggen te bouwen, maar om zelf een brug te zijn tussen techniek en maatschappij.

REFERENTIES

- Nunamaker, J.; Briggs, R.; Mittleman, D.; Vogel, D.; and Balthazard, P.A. (1997), 'Lessons from a Dozen Years of Group Support Systems Research: A Discussion of Lab and Field Findings', *Journal of MIS*, Vol. 13(3), blz. 163-207.
- Enserink, B., M.S. van Geenhuizen, R. Monnikhof, et al. 1997. 'Bovengronds of ondergronds? - een quick scan voor integraal afwegen - COB-studie N410 deel 2. Handboek Quick Scan' ISBN 90-37602-30-4
- Groot, R.S. de: *Functions of Nature*. Wolters Noordhoff, Groningen 1992
- Constanza, R., R. d'Arge, R. de Groot et al.: *The Value of The World's Ecosystem Services and Natural Capital*. *Nature*, Vol. 387, 1997.

NEDERLAND

ALS VERVOERSEMPLEMENT?

Dilemma's rond de ontwikkeling van
infrastructuren in de 21^{ste} eeuw

11
M.P.C. Weijnen
W.A.H. Thissen
E.F. ten Heuvelhof

• • •

De ruggegraat van economie en samenleving vormt de infrastructuur. Op dit moment is er op dit terrein veel beweging, in technisch, economisch en ook bestuurlijk opzicht. Tussen de veranderingen in de infrastructuursectoren zijn nog nauwelijks dwarsverbanden gelegd, terwijl daar volgens onderzoekers van de TU Delft alle reden toe is. Volgens hen dwingen de stormachtige ontwikkelingen, nu we op de drempel staan van de eenentwintigste eeuw, tot een herbezinning en wellicht een compleet nieuwe aanpak van ontwerp, aanleg, onderhoud, exploitatie én het beheer van infrastructuur. Een nieuw Delfts onderzoekscentrum legt niet alleen dwarsverbanden, maar zorgt ook voor analyses, oplossingen en nieuwe visies. Infrastructuren als wetenschappelijke en maatschappelijke uitdaging voor een volgende eeuw.

• • •

Na tweehonderd jaar Rijkswaterstaat past, naast een terugblik op wat er staat, een blik op wat komen gaat in het nieuwe millennium.

Als ontwerper en beheerder van natte en droge infrastructuur heeft Rijkswaterstaat een belangrijke rol gespeeld bij de ruimtelijke inrichting van Nederland. Rijkswaterstaat heeft grotendeels het gezicht bepaald van onze leefomgeving en mede de basis gelegd voor de voorspoedige economische ontwikkeling van Nederland. Nu we op de drempel staan van de eenentwintigste eeuw dringt de vraag zich op hoe de kernactiviteiten van Rijkswaterstaat in de komende eeuw gestalte krijgen. Wordt het business-as-usual of dwingen technologische en bestuurlijke ontwikkelingen Rijkswaterstaat tot een fundamenteel nieuwe aanpak van het ontwerp, de aanleg, het onderhoud, de exploitatie en het beheer van de infrastructuur?

Onderzoekers in Delft zijn van mening dat de huidige ontwikkelingen en de snelheid daarvan noodzaken tot een herbezinning op het ontwerp en beheer van infrastructuur. Om die stelling te onderzoeken en uit te werken tot concrete bijdragen aan de toekomst.

stige ontwikkeling van nieuwe infrastructures en de vernieuwing van bestaande infrastructures, heeft het College van Bestuur van de TU Delft in oktober 1997 een zogenoemd Delfts Interfacultair Onderzoekscentrum (DIOC) ingesteld voor het 'Ontwerp en beheer van infrastructures'.

INFRASTRUCTUREN IN BEWEGING

Infrastructures als ruggegraat van economie en samenleving; daarbij kan worden gedacht aan infrastructuur in de klassieke zin zoals die van waterwegen, spoorlijnen of het wegennet, maar ook aan infrastructuur die niet steunt op een fysiek distributienet zoals draadloze communicatie. Infrastructures zijn niet alleen in hoge mate bepalend voor de inrichting van onze ruimtelijke omgeving en ons individuele leefpatroon, maar vaak ook voorwaardenscheppend voor de ontwikkeling van een meer op dienstverlening gerichte economie. De keerzijde van de medaille is echter dat de snelle veranderingen in de maatschappij niet altijd op de voet kunnen worden gevolgd door de infrastructurale voorzieningen. Anders gezegd: infrastructures creëren economische en maatschappelijke ontplooiingskansen, maar kunnen daarvoor ook barrières opwerpen. Vooral de fysieke infrastructures kunnen, door hun hoge kapitaalintensiteit en lange levensduur, slechts langzaam worden aangepast aan veranderende omgevingscondities en wensen van gebruikers.

Op dit ogenblik is er in technisch, economisch en bestuurlijk opzicht veel beweging rond de infrastructurale voorzieningen en de exploitatie ervan.

Bestuurlijke ontwikkelingen

Belangrijke onderzoeksvragen worden opgeworpen door de liberalisering van de exploitatie van infrastructures en het terugtreden van de overheid. Zowel bij de aanleg als bij het beheer en de exploitatie van infrastructurale voorzieningen doen zich momenteel verschillende vormen van privatisering voor. Die komen tot uitdrukking in nieuwe eigendomsarrangementen, combinaties van publiek en privaat, die per type infrastructuur sterk van elkaar kunnen verschillen. Een belangrijk maatschappelijk aspect is dat bij voorzieningen het onderscheid tussen centrum en periferie in relevantie toeneemt. Waar voorzieningen (lokaal) verliesgevend zijn, bestaat de zorg dat terugtreden van de overheid leidt tot een lager voorzieningenniveau of zelfs tot het lokaal verdwijnen van de voorziening. Hoe ver reikt de waarborgfunctie van de overheid in dergelijke situaties? Liberalisering en concurrentie zijn toverwoorden in de discussie over infrastructuur, maar het organiseren van 'eerlijke' en economisch doelmatige concurrentie blijkt in de praktijk voor grote problemen te zorgen. Door de technologische dynamiek in infrastructurale voorzieningen wordt tenslotte ook regelgeving steeds sneller achterhaald.

Economische ontwikkelingen

In een aantal sectoren leidt de technologische dynamiek tot groeiende onzekerheid over de rentabiliteit van investeringen. Welke afschrijvingstermijnen moeten worden gehanteerd? Wie zijn de klanten? Welke prijs is voor bepaalde diensten aanvaardbaar? Hoe ligt de verhouding tussen de betrouwbaarheid en de prijs van voorzieningen? Hoe moet het feit dat capaciteit een schaars goed is bij de verdeling van de kosten tot uitdrukking worden gebracht (bijvoorbeeld bij een koppelnet waarvan meerdere distributiebedrijven gebruik maken)? Bij de aanleg van infrastructurale voorzieningen bestaat vaak een spanningsveld tussen de maatschappelijke baten en de commerciële baten voor de investeerder. Deze spanning doet zich met name voor als om politieke dan wel andere redenen de mogelijkheden tot invoering van een gebruikersheffing beperkt zijn. Tot nu toe geldt dit voor de aanleg van wegen. Nieuwe informatietechnologie kan dit probleem in de toekomst kleiner maken. In het algemeen stijgt het aandeel van de private sector sneller in de exploitatie van

infrastructurele voorzieningen dan bij de aanleg ervan. Wat betekent (het ontbreken van) een scheiding tussen beheerder en benutter van infrastructurele voorzieningen?

Technologische ontwikkelingen Vaak mogelijk gemaakt door technologische innovaties vindt er bij veel infrastructuren een snelle opkomst plaats van decentrale (veelal private) voorzieningen die de rentabiliteit van de (veelal publieke) centrale voorzieningen bedreigen. Denk in dit verband bijvoorbeeld aan kwesties als de auto versus openbaar vervoer of aan industriële warmte/kracht-koppeling versus de grote elektriciteitscentrales. Gelet op de lange levensduur van fysieke infrastructuren is het van cruciaal belang om al in de ontwerpfase adequaat in te spelen op toekomstige technologische ontwikkelingen, en op te voorziene ontwikkelingen in de topografie van de gebruikersgemeenschap en de capaciteitsvraag. Te voorziene behoeften aan bijvoorbeeld grotere capaciteit of aan differentiatie van producten en diensten moeten al bij het ontwerp worden ingebouwd, met inachtneming van de gewenste mate van betrouwbaarheid van de betrokken voorziening. De stijgende behoefte aan flexibiliteit van de gemencipeerde consument, die op maat wenst te worden bediend, vergt een meer vraagrijde-gerichte benadering bij het ontwerp van infrastructurele voorzieningen dan de traditionele centralistische benadering waarbij grootschalige technologische aanbodopties vertrekpunt waren. Het is hierbij de vraag hoeveel flexibiliteit intrinsiek in het ontwerp van de infrastructurele **hardware** kan of moet worden ingebouwd en hoeveel flexibiliteit extrinsiek kan of moet worden gerealiseerd door operationele ingrepen en beheersmaatregelen. Voor de verre toekomst kan zelfs de vraag worden gesteld of infrastructuren voor multifunctionaliteit ontworpen kunnen worden, om functionele flexibiliteit en een zo hoog mogelijke rentabiliteit te combineren.

Technologische ontwikkelingen leiden onder meer tot veranderingen in schaalniveaus (opkomst van decentrale voorzieningen), integratie van functies (zoals informatie- en



© Jurjen Dienth

Bushalte langs de IJssel bij Gouderak.

communicatiediensten via de stroomkabel) en, althans in potentie, tot een gevarieerder aanbod van producten en diensten. Traditioneel had de gebruiker, in het bijzonder de individuele consument en andere 'kleinverbruikers', weinig keuzevrijheid in de wijze waarop hij werd bediend. De consument kon wel of niet aangesloten zijn op het net voor een voorziening zoals elektriciteit, telefoon, aardgas, drinkwater of riolering. Daarbij had (en heeft) de consument echter weinig of geen keuze tussen verschillende kwaliteitsniveaus van de voorziening of dienstverlening en de daaraan verbonden prijssoorten. De veranderingen op economisch en bestuurlijk gebied, waaronder de liberalisering van markten en de privatisering van nutsfuncties, blijken niet vanzelf te resulteren in een ruimer voorzieningenaanbod. Eisen rond rentabiliteit, in combinatie met onzekerheid, zijn voor private investeerders reden voor terughoudendheid en bestaande voorzieningen zijn soms op lokaal of regionaal niveau commercieel niet aantrekkelijk. Daarnaast belemmert de sterke marktpositie van voormalige monopolisten in een aantal sectoren het ontstaan van concurrentie.

In het beheer van infrastructuur is sprake van een algemene kentering van **supply side management** naar **demand side management**. Dit noodzaakt de beheerders van infrastructurele netwerken en diensten tot **integrated resource planning** en brengt een toenemende aandacht met zich mee voor de technologie van het eindgebruik en voor de psychologie van de eindgebruiker.

DE MAATSCHAPPELIJKE UITDAGING De maatschappelijke discussie over aanleg, beheer en exploitatie van infrastructuur is op dit moment al volop gaande, en zal ongetwijfeld nog in intensiteit toenemen. Met de besluitvorming over uitbreiding van infrastructuur, de aanleg van nieuwe infrastructuur en nieuwe beheersvormen worden zowel de kansen als de belemmeringen voor de toekomstige ontwikkeling van economie, maatschappij, milieu en natuur in ons land gecreëerd. Nederland lijkt hard op weg een gigantisch vervoerseplacement te worden, waarvan volgens sommigen de economische baten niet opwegen tegen de maatschappelijke lasten. Daar tegenover staan de geluiden dat de voorgenomen investeringen in nieuwe infrastructuur de motor zullen zijn van economische groei, en dat de belangen van milieu en natuur daarbij afdoende worden beschermd. Er is geen analysemethode die een ondubbelzinnige afweging van maatschappelijke baten en lasten garandeert. Ook de technologische afweging van alternatieven leidt zelden tot een eenduidig resultaat. In de recente en lopende besluitvorming over infrastructurele voorzieningen (de uitbreiding van Schiphol, de aanleg van de HSL en de Betuwelijn) valt verder op dat er veel onvrede bij de burgers ontstaat door onvoldoende transparantie van en invloed op het besluitvormingsproces.

De besluitvorming over infrastructurele werken verloopt in Nederland bijzonder traag. Niet zelden zijn er decennia gemoeid met de besluitvorming over nieuwe infrastructuur. Die traagheid brengt het risico met zich mee dat nieuwe infrastructuur bij hun aanleg al bijna weer verouderd zijn, omdat er inmiddels nieuwe technologische ontwikkelingen hebben plaatsgevonden. De vele weerstanden die tijdens de besluitvorming moeten worden overwonnen, zullen nog sterker worden naarmate er meer partijen met conflicterende belangen bij betrokken zijn, zoals de komende decennia met de voorziene economische groei en groei van de bevolking in Nederland verwacht mag worden. De snel voortschrijdende technologische ontwikkeling vraagt om ontwerpmethoden die flexibeler ontwerpen mogelijk maken, om zo optimaal te kunnen inspelen op technologische innovaties die zich voordoen tijdens de besluitvormingsperiode en tijdens de



Nederland Vervoersland.

exploitatie van nieuwe infrastructures. De individualisering van de maatschappij vraagt om een meer vraag-gestuurde ontwerpbenadering en om een zodanige herinrichting van de besluitvormingsprocessen dat burgers en belangenorganisaties niet reactief, maar actief en constructief erbij worden betrokken. Een versnelling van het besluitvormingsproces zou daarbij wenselijk zijn.

De aanleg van infrastructures als ‘publieke werken’ is lange tijd een typische overheidsaangelegenheid geweest. Economische en bestuurlijke veranderingen hebben dit minder vanzelfsprekend gemaakt. Toch is de rol van de private sector in de aanleg en het beheer van fysieke infrastructurele voorzieningen niet binnen alle soorten infrastructuur zo sterk toegenomen als werd gedacht en vaak gehoopt. De hoge investeringsrisico’s zijn hieraan debet. Meer belangstelling bestaat voor het gebruik van infrastructures door aanbieders van diensten. Hier echter hebben de oude monopolisten vaak een dubbelrol: die van beheerder zowel als benutter, en trachten zij soms voorwaarden te bedingen voor toetreding door andere private aanbieders. Vooral bij regionale verschillen in rentabiliteit van dezelfde diensten zijn oude monopolisten beducht voor andere partijen die trachten alleen de meest rendabele diensten aan te bieden. Een ander aspect is de toewijzing van schaarse ruimte voor exploitatie. Hiervoor zijn verschillende mechanismen, zoals regulering en veilingen.

Door het onderscheid tussen aanleg en exploitatie heen loopt het beheersaspect, waarbij in de praktijk in toenemende mate sprake is van een verwevenheid van publiek en privaat. Behalve de condities voor een dergelijke ‘hybridisering’, die worden ingegeven door overwegingen van effectiviteit en efficiëntie, speelt hier ook het aspect van de politieke verantwoordelijkheid. Waarvoor blijft de publieke sector verantwoordelijk? Welke - financiële - garanties kan en moet deze stellen tegenover private investeerders?

Zowel bij de aanleg als bij de exploitatie van infrastructurele voorzieningen zijn de maatschappelijke baten niet altijd gelijk aan de bedrijfseconomische baten. Bij de aanleg en beheer van de hardware speelt de vraag welke mogelijkheden tot gebruikersheffingen er bestaan. Als die beperkt zijn en private investeerders zich daardoor terughoudend opstellen, zullen het vooral maatschappelijke overwegingen (verwachte baten) zijn die de overheid doen besluiten zelf al dan niet tot aanleg en publieke financiering over te gaan. Met name bij de financiering van tunnels zijn hiermee ervaringen opgedaan. Een meer algemene vraag is op welke wijze de baten worden bepaald.

DE WETENSCHAPPELIJKE UITDAGING

De technologische, economische en bestuurlijke veranderingen die momenteel in de diverse infrastructuren plaatsvinden, zijn in veel opzichten vergelijkbaar en hebben ook een vergelijkbare oorsprong. Kenmerk van de publieke discussie en ook van het onderzoek naar de ontwikkelingen en hun gevolgen voor het ontwerp en beheer van infrastructuren is echter, dat beide meestal beperkt blijven tot een specifieke sector, zoals vervoer of telecommunicatie. Hierdoor krijgen onder meer substitutiemogelijkheden en hun effecten nog te weinig aandacht. Zowel vanuit technologisch als vanuit bestuurlijk perspectief zijn er tot nu toe weinig of geen dwarsverbanden gelegd tussen verschillende infrastructuren.

Juist deze dwarsverbanden staan centraal in het nieuwe Delftse interfacultaire onderzoekscentrum (DIOC) Ontwerp en Beheer van Infrastructuren. Het DIOC-onderzoekprogramma heeft als doel 'op basis van een vergelijkend onderzoek naar de technische en bestuurlijke ontwikkelingen in vijf infrastructurele sectoren een generiek programma van eisen af te leiden voor het ontwerp en het beheer van toekomstige infrastructurele voorzieningen, alsmede voor de inrichting en sturing van het ontwerpproces zelf en voor de daaraan gekoppelde besluitvormingsprocessen'.

Binnen elk type infrastructuur bestaan vergelijkbare technologische, economische en bestuurlijke ontwerp-vraagstukken, richtingen voor oplossingen en arrangementen. Een systematische vergelijkende analyse zal niet alleen het inzicht vergroten in sectorspecifieke ontwikkelingen en oplossingsrichtingen, maar ze zal ook generieke ontwikkelingen en meer algemeen toepasbare oplossingen zichtbaar maken. Ondanks de grote technische verschillen tussen de diverse typen infrastructuur vertonen de technologische en bestuurlijke dilemma's bij het ontwerp en beheer grote overeenkomsten. Op basis daarvan lijkt het mogelijk en zinvol een nieuwe, generieke benadering te ontwikkelen voor het ontwerp en beheer van infrastructuren.

HET ONDERZOEKSPROGRAMMA

In de eerste fase van het onderzoek, vijf jaar, worden in vijf deelprojecten vijf specifieke sectoren van infrastructuur onder de loep genomen:

- energie (elektriciteit, aardgas en warmte)
- telecommunicatie
- water (drink-, industrie- en afvalwater)
- afvalverwijdering
- transport van personen en goederen.

In elk van de sector-specifieke projecten zal onderzoek verricht worden naar

- de technologische ontwikkelingen aan de aanbodkant
- de technologische ontwikkelingen aan de vraagkant

- de morfologie van de huidige Nederlandse infrastructuur (karakterisering van de netwerkstructuur, voor zover er een fysiek netwerk aanwezig is)
- de huidige ontwerpmethoden en de ontwikkeling daarvan, op de diverse systeemniveaus (zoals component - apparaat - proces - lokaal netwerk - sector)
- de compatibiliteit van ontwerpmethoden zoals die op de verschillende systeemniveaus worden toegepast
- de topografie van de gebruikersgroep
- de morfologie van de betreffende infrastructuur in een geselecteerd aantal andere landen, en
- mogelijkheden voor multi-functionaliteit (op verschillende systeemniveaus).

Bij het onderzoek gaat het om volledige infrastructuursystemen; met andere woorden om de integratie van productie-, opslag-, distributie- en gebruiksfuncties.

Tegelijkertijd wordt een viertal sector-overstijgende projecten expliciet gericht op nadere specificatie van de generieke onderzoeksvragen voor infrastructuren, met de bedoeling deze vraagstukken hanteerbaar te maken en om te zetten in voor de betrokken sector specifieke onderzoeksvragen. Bij deze generieke projecten handelt het om onderzoek naar:

- de ontwerpstrategieën voor infrastructurele netwerken
- de (technische) besturing en bedrijfsvoering van infrastructurele netwerken
- de bestuurlijke inrichting en organisatie van het beheer van infrastructuren
- de economie van infrastructuren.

De bedoeling is een sterke wisselwerking te laten ontstaan tussen de sectorspecifieke en generieke onderzoeksprojecten, voor alle aspecten van de vragen bij de sectorspecifieke projecten. De onderzoekers op het generieke niveau moeten worden 'gevoed' met sectorspecifieke informatie van de verschillende infrastructuren om de vertaalslag naar het generieke niveau te kunnen maken en zeker te stellen dat de generieke onderzoeksresultaten op hun beurt vertaald kunnen worden naar de technisch-fysieke en bestuurlijke realiteit. Anderzijds moet binnen het generieke onderzoek het **format** worden gedefinieerd voor de sectorspecifieke onderzoeksbevindingen. Bovendien kunnen de sectoroverstijgende onderzoekers, vanuit hun generieke inzichten, wellicht kennisleemten en innovatiekansen aangeven voor het sectorspecifieke onderzoek.

De selectie van infrastructuren in het sectorspecifieke onderzoek is zodanig dat het voor de onderzoekers in de sectoroverstijgende projecten mogelijk is interdependenties tussen infrastructuren alsmede substitutiemogelijkheden en hun effecten te bestuderen.

Het programma zal tenslotte een belangrijke internationale dimensie hebben. Internationaal vergelijkend onderzoek voor elk type infrastructuur maakt deel uit van de doelstellingen. Veranderingen die in het buitenland zijn doorgevoerd en in Nederland ter discussie staan, zullen diepgaand worden geanalyseerd. De resultaten zullen bruikbaar zijn voor de aanpak van fundamentele vraagstukken, maar ook voor de advisering bij actuele vragen.

ONDERZOEKSVRAGEN VOOR RIJKSWATERSTAAT Wat volgt is een greep uit de vragen die in het Delftse onderzoekcentrum Ontwerp en Beheer van Infrastructuren aan de orde zullen komen, niet alleen om de lezer een indruk te bieden van de aanstaande

wetenschappelijke uitdaging maar ook van de (maatschappelijke) relevantie van het onderzoek en het belang voor Rijkswaterstaat.

De natte infrastructuur In tegenstelling tot de afvalwaterinzameling en -verwerking, waar een snelle opkomst te zien viel van de decentrale (industriële) zuiveringseenheden, zijn de drink- en industriewaterbereiding nog steeds sterk gecentraliseerd. Zorgen voor de toekomst betreffen onder meer de grondstofbeschikbaarheid (kwalitatief en kwantitatief), in relatie tot het watergebruik door landbouw, industrie en huishoudens. In theorie kan deze complexe problematiek, rekening houdend met de samenhang tussen aanbod- en gebruikszijde en de verschillende systeemniveaus, worden aangepakt door 'integraal waterbeheer'. In de praktijk is het echter de vraag in hoeverre integraal waterbeheer haalbaar is, gegeven de bestuurlijke en geografische segmentatie in het waterbeheer en de interacties met andere beleidsterreinen, binnen en buiten het departement van Verkeer & Waterstaat.

De drinkwatervoorziening is nog steeds ingericht als een traditionele nutsvoorziening, ze is als zodanig vergelijkbaar met de elektriciteitsvoorziening in Nederland voor 1980 (vóór de opkomst van decentrale opwekking). Net als bij andere infrastructuur zijn ook hier de eerste tekenen merkbaar van vernieuwing. Grootverbruikers wensen keuzevrijheid, onder meer bij de bepaling van de kwaliteit van de voorziening en bij de prijs/kwaliteitsverhouding. Het eerste zichtbare gevolg hiervan is de levering van 'grijs' water aan industriële grootverbruikers zoals Moerdijk. Ook op wijkniveau (Ede) wordt er 'grijs' water geleverd aan individuele huishoudens, naast drinkwater. Net zoals bedrijven en huishoudens in Nederland doorgaans aangesloten zijn op meer dan één energie-infrastructuur (electriciteit en gas) is het denkbaar dat we in de toekomst ook op een dubbele infrastructuur zijn aangesloten voor respectievelijk drinkwater en 'grijs' water.

Een alternatief dat eveneens nader onderzoek verdient is vergaande decentralisering van de drinkwaterbereiding, waarbij het waterleidingsbedrijf slechts 'grijs' water aanvoert naar onze woningen en waarbij we slechts dat gedeelte dat werkelijk drinkwaterkwaliteit moet zijn verder zuiveren tot drinkwater (bijvoorbeeld met behulp van omgekeerde osmose). In dat geval kan het waterleidingbedrijf volstaan met een minder diepe en dus goedkopere centrale zuivering, maar verschuift de zuiveringstaak naar het leveren, installeren en/of onderhouden van de gedistribueerde zuiveringseenheden op wijk- of woningniveau.

Met deze optie kan verspilling van drinkwater voor laagwaardige doeleinden (toiletspoeling, wassen van kleding en auto, tuin besproeien) wellicht worden teruggedrongen. De feitelijke drinkwaterbehoefte bedraagt immers niet meer dan circa 3 liter per persoon per dag. Steeds meer mensen drinken nauwelijks nog water uit de kraan, getuige de explosieve groei van de markt voor gebotteld mineraalwater. Rationeel bekeken is dat niet beter van kwaliteit - eerder minder - dan het Nederlandse drinkwater. Emotioneel bekeken echter is mineraalwater een natuurprodukt, dat door de meeste mensen wordt geassocieerd met gezondheid. De beschikbaarheid van goed grondwater voor de drinkwaterbereiding zal de komende decennia in grote delen van het land nog verslechteren door vermesting, het gebruik van pesticiden (in het verleden, gevolgd door transport naar de watervoerende lagen), vervuilde bedrijfsterreinen plus legale en illegale stortpraktijken. Daarbij komt dat grondwater niet ongelimiteerd gewonnen kan worden, onder meer in verband met de overlevingskansen van waardevolle natuurgebieden in ons land.

De kwaliteit van het oppervlaktewater is in de loop der jaren weliswaar verbeterd maar

is nog steeds slecht vergeleken met die van het meeste grondwater, en bovendien kan de kwaliteit slechts beperkt door Nederlandse maatregelen worden verbeterd. In dit perspectief verdient de decentrale zuiveringsoptie nadere studie als een mogelijk goedkoper (dubbele infrastructuur is kostbaar) en betrouwbaarder alternatief (er bestaat immers geen kans op verontreiniging van het drinkwater tijdens het transport naar de gebruiker).

Bij de afvalwaterzuivering is een sterke opkomst zichtbaar van decentrale zuiverings-eenheden: industriële afvalwaterzuivering is zo succesvol en wordt zo breed toegepast, dat diverse rioolwaterzuiveringsinstallaties inmiddels kampen met dreigende overcapaciteit. Intussen is er ook bij de industrie groeiende aandacht voor gedistribueerde waterzuivering op het niveau van deelstromen in het bedrijf (in plaats van of ter ontlasting van de 'ouderwetse' centrale **end-of-pipe** afvalwaterzuiveringsinstallatie).

Deze aanpak maakt drastische reducties mogelijk van de waterinname (intern hergebruik, eventueel in cascade van afnemende kwaliteit) en van de vuilbelasting van het afvalwater. De consequenties daarvan voor de rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) worden voelbaar. Daarnaast zijn ontwikkelingen gaande naar vermindering van het industrieel watergebruik door samenwerking tussen bedrijven onderling. Een voorbeeld van dit laatste is Maastricht.

Is liberalisering van de markt denkbaar zonder concessies aan de kwaliteit van de watervoorziening en het onderhoud van de infrastructuur? In andere landen is er grote bezorgdheid bij het publiek (Verenigd Koninkrijk, Frankrijk) - maar is die terecht? Zijn de ongewenste effecten zoals achterstallig onderhoud, hogere tarieven, verminderde kwaliteit van het product en verminderde dienstverlening onvermijdelijk? Is het denkbaar dat we straks kunnen kiezen uit verschillende leveranciers, bijvoorbeeld het geprivatiseerde drinkwaterleidingsbedrijf en de naburige brouwerij? Hoe zullen de toegankelijkheid tot de waterinfrastructuur en de kwaliteit van de dienstverlening worden gewaarborgd voor de sociaal zwakkeren? Moeten de RWZI's in de toekomst niet meer **upstream** activiteiten gaan ontplooiën, analoog aan de energiedistributiebedrijven?

Zoals de energiebedrijven tegenwoordig industriële warmte/kracht-installaties beheren (**outsourcing** van energie-utilities door ondernemingen), zo is het denkbaar dat de waterleidingbedrijven in de toekomst de **on site** waterbehandeling van industriële bedrijven voor hun rekening nemen en dat de rioolwaterzuiveringsbedrijven de industriële afvalwaterzuivering gaan verzorgen - eventueel in combinatie met waterbesparende adviesdiensten.



Duwboot op de Maas

De droge infrastructuur De complexiteit van de onderzoeksvragen is bij de droge infrastructuur zo mogelijk nog groter dan bij de zogeheten natte infrastructuur. Vele projecten en plannen verdringen elkaar in de maatschappelijke discussie: de Hoge Snelheids Lijn, de Betuwelijn, de uitbreiding van Schiphol, de mogelijkheid van een nieuwe - tweede - luchthaven, rekening rijden. De problemen zijn velerlei: congestie, geluidhinder en andere vormen van milieuverontreiniging, competitie met ruimte voor natuur, recreatie en wonen.

Het valt op dat in toenemende mate wordt gekozen voor **dedicated** infrastructuur: een aparte goederenspoorlijn, een aparte hoge snelheidslijn, en op de autowegen verschijnen er doelgroepstroken zoals carpoolstroken, vrije busbanen, aparte rijstroken voor vrachtwagens. De eerste ervaringen met de liberalisering en de privatisering van de Nederlandse Spoorwegen en het streekvervoer laten te wensen over; vooralsnog lijken deze veranderingen niet te leiden tot terugdringen van de automobiliteit. Als uitvloeisel van de maatschappelijke individualisering zal de groei van autobezit én autogebruik moeilijk in te dammen zijn. Geen enkele vorm van openbaar vervoer biedt een vergelijkbare vorm van mobiliteit op maat. Het is nog zeer de vraag hoe hoog de rekening voor 'rekeningrijden' moet worden om de congestieproblemen tijdens de spits te verminderen, en in hoeverre automatische verkeersgeleidingssystemen daarbij in de verre toekomst behulpzaam zullen zijn. De publieke acceptatie van automobilitieitsbeperkende maatregelen is begrijpelijkerwijs gering zolang betrouwbaarheid, prijs en comfort van het openbaar vervoer niet aanmerkelijk worden verbeterd. Daar komt bij dat velen weinig keuze hebben sinds er jarenlang een beleid van regionale spreiding van overheidsdiensten is gevoerd, de inrichting van bedrijventerreinen langs de snelwegen is gestimuleerd en er vele woonwijken in groengebieden ver buiten de stadscentra zijn verzezen.

Kan de beoogde verbetering van de kwaliteit van de dienstverlening (tegen een redelijke prijs) in het openbaar vervoer wel door marktwerking worden gerealiseerd? En zo ja, hoe moet de concurrentie in de markt dan worden georganiseerd? Hoe wordt verzekerd dat exploitanten van transportinfrastructuur de door hen aangeboden diensten, denk bijvoorbeeld aan de dienstregelingen voor vervoer, op elkaar afstemmen? Met andere woorden: hoe wordt de interconnectiviteit van vervoersdiensten georganiseerd en bewaakt? En hoe wordt de schaarse fysieke capaciteit 'eerlijk' verdeeld? Hoe wordt het toezicht op de kwaliteit van de dienstverlening ingericht? Waar begint en eindigt de politieke verantwoordelijkheid?

Er zijn vele beheersmaatregelen denkbaar om pieken in de belasting van infrastructuur in duur en intensiteit te beheersen. Voor de congestieproblemen op wegen en spoorlijnen is **peak shaving** door variabelere werktijden en / of door telewerken een interessante oplossing. Beide opties zijn niet nieuw, maar tot dusverre opvallend weinig succesvol geweest. De moderne telecommunicatietechnologie heeft per saldo geleid tot een sterk verhoogde behoefte aan communicatie, en niet tot significante substitutie van de behoefte aan fysieke mobiliteit. Onder welke voorwaarden zou dit substitutie-effect, indien gewenst, wél kunnen worden bereikt? De telecommunicatiesector is overigens ook om andere redenen interessant voor Rijkswaterstaat, in de zin dat deze sector voorloopt op de overige infrastructuur bij de overgang naar privatisering van voormalige nutsbedrijven en naar liberalisering van de markt.

Beheersmaatregelen die voor één specifieke infrastructuur worden genomen, kunnen ook hun weerslag hebben op andere infrastructuur. Zo zal bijvoorbeeld verkeersdruk-

tespreiding door variabele werktijden ook leiden tot 'uitsmeren' van pieken in het elektriciteitsgebruik en bijvoorbeeld de behoefte aan ruimteverwarming.

Een groot deel van de fysieke infrastructuur ligt al onder de grond en voor transportinfrastructuur wordt in toenemende mate ondergrondse aanleg overwogen. Dit biedt interessante mogelijkheden voor combinatie of integratie van functies en voor integratie van monitoring en onderhoud. Voor de toekomst zou moeten worden nagegaan in hoeverre planning, monitoring en onderhoud van verschillende ondergrondse infrastructuur in technische zin geïntegreerd kunnen worden. Daarbij valt te denken aan toepassingen van Geografische Informatie Systemen (GIS) en aan toepassing van geofysische exploratietechnieken voor de ondiepe ondergrond. Overigens gaat daaraan vooraf de vraag, op welke gronden ondergrondse aanleg al of niet de voorkeur verdient boven bovengrondse aanleg van infrastructuur.

TENSLOTTE De vormgeving van concurrentie is niet slechts een kwestie van liberalisering en regelgeving die toetreding van nieuwe aanbieders tot de markt mogelijk maakt. Door het bestaan van oude monopolisten die soms in verschillende sectoren van infrastructuur tegelijkertijd de **hardware** beheren kan concurrentievervalsing door onder meer kruissubsidiëring optreden. Om deze reden is de vormgeving van toezicht op concurrentie evenzeer van belang. De te verwachten variatie tussen sectoren in marktwerking vraagt bovendien om aangepaste vormen van consumentenbescherming.

Een toenemend aantal zogenoemde spelers aan de aanbodkant en een steeds grotere variatie in doelgroepen aan de vraagzijde vragen om geschikte mechanismen voor coördinatie en conflictoplossing. Coördinatie is vooral van belang voor capaciteitsplanning bij toenemende decentralisatie. Conflictoplossingsmechanismen zijn noodzakelijk bij toenemende concurrentie. Mogelijkheden hiertoe variëren van zelforganisatie binnen de sector, via de rechter, tot het in het leven roepen van een speciale publieke instantie.

De recente ontwikkelingen in de verschillende infrastructuur laten een diversiteit zien aan rollen voor de overheid, van interveniërend tot faciliterend. Twee relatief nieuwe rollen binnen de infrastructuur zijn die van privaatrechtelijke partner resp. aanjager van nieuwe voorzieningen en technologieën (de overheid als **launching customer**). Daarnaast staat ook de meest klassieke (overheids)rol, die van waarborger van voorzieningen, in de aandacht.

Op dit ogenblik heeft het Delftse Interfacultaire OnderzoekCentrum (DIOC) voor het Ontwerp en Beheer van Infrastructuur nog meer onderzoeksvragen dan antwoorden. Een groot aantal nieuwe onderzoekers, promovendi en post-doc's staat inmiddels in de startblokken. Zij zullen de komende jaren van zich doen spreken, niet alleen op terreinen waarbij Rijkswaterstaat is betrokken als beheerder van natte en droge infrastructuur maar ook op het gebied van de infrastructuur voor telecommunicatie, afvalverwijdering en energievoorziening.

IMMOBILISATIE VAN
GEVAARLIJK **AFVAL**

In een permanente houdgreep - van
probleem naar product

Ch. F. Hendriks
12

• • •

Immobilisatie van gevaarlijk afval, tot voor enkele jaren onbespreekbaar, wordt tegenwoordig gestimuleerd. De reden: het aanbod van gevaarlijk afval neemt toe, de stortruimte wordt schaarser. Immobilisatie betekent grofweg de fysische of chemische eigenschappen van het afval onschadelijk maken. Maar de technieken om immobilisatie toe te passen, zijn nog jong en omgeven met veel onzekerheden. Onderzoekers en mogelijke afnemers vinden implementatie daarom vooralsnog te riskant. Op deze plaats een indruk van onderzoek in Nederland naar immobilisatietechnieken. Ook geeft dit hoofdstuk aan waarom een integrale afweging van de technieken, op economisch rendement, milieurendement en lange-termijngedrag, de maatschappelijke acceptie van immobilisatie vergemakkelijkt.

• • •

Bij de tweehonderdste verjaardag van Rijkswaterstaat kan worden gesteld dat het doel waarom men infrastructuur aanlegt en beheert, niet meer los gezien kan worden van de maatschappelijke acceptatie. Zo worden onderzoeksvragen en oplossingsrichtingen onder andere geformuleerd vanuit de principes van duurzame ontwikkeling, zoals verwoord in het Brundtlandt-rapport. Misschien is het wel een voordeel dat in het Nederlands taalgebruik duurzaam twee betekenissen heeft: duurzaam in de zin van **durable** en duurzaam in de zin van **sustainable**. Gestreefd moet worden naar een vernuftige combinatie van beide. Het streven van zowel Rijkswaterstaat als de Technische Universiteit Delft naar de bedoelde integratie is te zien in het project Immobilisatie van afvalstoffen.

Sinds enkele jaren wordt door het ministerie van VROM de immobilisatie van gevaarlijk afval gestimuleerd, nadat dit eerst een onbespreekbare optie was. Gevaarlijk afval bestaat bijvoorbeeld uit slakken, assen of slib waarvan het verontreinigingsgehalte in de samenstelling hoger is dan aangegeven in het Besluit aanwijzing gevaarlijk afval (BAGA). In Japan, de Verenigde Staten en Frankrijk is al langer onderzoek naar immobilisatie gaande en zijn enkele technieken in de praktijk gebracht. Immobilisatie is een verza-

melnaam voor een aantal bewerkingen of technologische ingrepen waarbij de fysische en/of chemische eigenschappen van een reststof zodanig worden gewijzigd dat de mate van verspreiding van milieu verontreinigende stoffen door uitloging, erosie of verstuiving op korte en lange termijn vermindert.

Immobilisatie van gevaarlijk afval is bespreekbaar geworden door het toenemende aanbod aan gevaarlijk afval aan de ene kant en de schaarse (stort)ruimte aan de andere kant. Dit artikel wil een algemeen overzicht geven van onderzoek in Nederland naar immobilisatie van afvalstoffen. Immobilisatietechnieken in Nederland bevinden zich nog de beginfase van de implementatie. Daardoor bestaat nog veel onzekerheid bij onderzoekers en mogelijke afnemers, zowel door de onbekendheid van het nieuwe eindproduct als door de wetgeving en door het negatieve imago. Door de onzekerheden is de implementatie van immobilisatietechnieken risicovol voor onderzoeker en afnemer. Een immobilisaat van civieltechnisch en milieuhygiënische kwaliteit loopt de kans niet geaccepteerd te worden. Dit is ook de reden dat een promotieonderzoek is gestart, gefinancierd door onder andere Rijkswaterstaat, op een integrale afweging van immobilisatietechnieken, economisch rendement, milieurendement en op lange-termijn- gedrag. In dit kader wordt verslag gedaan van de **sustainability** (milieurendement) en **durability** (lange- termijngedrag) van immobilisatietechnieken in Nederland.

Anorganische immobilisatie is vooral gebaseerd op het toevoegen van cement als bindmiddel aan het afval. Er is overigens ook onderzoek gedaan naar immobilisatie op basis van zwavel. De cementgebonden immobilisatie wordt in verschillende landen in praktijk gebracht, zoals de Verenigde Staten en Japan. In Nederland zijn laboratoriumstudies uitgevoerd op verschillende afvalstoffen. Immobilisaten van zink-as, verontreinigde grond en zuiveringsslib zijn als proefproject in de praktijk gebracht als wegfunderingen. De wegfunderingen worden zonder isolatievoorziening uitgevoerd, wel is de fundering boven afgedicht met asfalt. Door een controlesysteem kunnen slechte delen van de wegfundering eventueel opgespoord worden en verwijderd. Ook bij drie AVI's wordt immobilisatie in praktijk gebracht, namelijk door het mengen van AVI-vlieg-as, filterkoek, spreedroogzout en afvalwater met cement.

Immobilisatie op basis van cement is gebaseerd op proceseigenschappen voor de verharding van beton. Als het afval meer dan 50% vrij water bevat, is ontwateren nodig. Eventueel kan het toevoegen van additieven voor het toevoegen van cement nodig zijn voor een bepaalde chemische fixatie. Daartoe wordt het afval eerst gehomogeniseerd. Daarna wordt het afval gemengd met, indien nodig, water, cement en eventueel additieven bij kamertemperatuur. Er wordt tussen de 20 en 60 gewichtsprocent cement toegevoegd ten opzichte van de afvalstof(fen). De keuze voor het cement hangt onder andere af van de gewenste pH. De specifieke immobilisatie wordt verkregen door een juiste keuze van de additieven. Na het mengen volgt een verhardingstijd in een vorm.

UITLOGING Het al dan niet uitlogen van elementen uit het afval, hangt samen met fysische en chemische immobilisatie mechanismen. Fysische mechanismen komen voort uit de verharding van het materiaal en de porositeit van het materiaal. Doordat de uiteindelijke matrix harder is dan het cement, worden de meeste elementen fysisch opgesloten. Organische elementen, zouten, vluchtige elementen, zoals kwik en oxyanionen, zijn over het algemeen fysisch en chemisch niet goed vast te leggen. Sommige elementen uit het afval hebben een negatieve invloed op de verharding. Deeltjes kleiner dan 74 μm verzwakken de binding tussen afval en cement door een laag om de grotere deeltjes te vormen. Hierdoor wordt behalve de fysische binding ook de chemische binding van sommige elementen tegengegaan. Organische elementen in het afval



De Slufter bij Europoort kan zo'n 150 miljoen kub vervuild havenslib herbergen.

kunnen eveneens een minder sterk product tot gevolg hebben. Door de aanwezigheid van olie of vet bijvoorbeeld verzwakt de binding tussen toeslagmateriaal en cement. Ook kunnen organische elementen bij de hoge pH omgezet worden naar oplosbare elementen, waaraan vervolgens sporenelementen hechten. Oplosbare zouten kunnen een toename van de porositeit tot gevolg hebben en daarmee een afname van de sterkte, doordat deze elementen uitspoelen.

Chemische mechanismen zijn het gevolg van de chemische aantrekking van oppervlakte-atomen en door precipitatie van hydroxyden. Sommige zware metalen, zoals cadmium, kunnen via adsorptie en chemisorptie gebonden worden in de cementmatrix. Deze elementen worden opgenomen in de kristallijne structuur van het cement. Sommige cationen slaan neer als hydroxyden door de hoge pH. Echter, de meeste cationen zijn het minst oplosbaar bij pH 8-10. Boven deze pH, pH van het cement is ongeveer 13, neemt de oplosbaarheid toe, zie afbeelding 1. Ook de oplosbaarheid van oxyanionen, zoals molybdaat, is hoog bij deze pH. Een voordeel van de hoge pH is dat bij een pH > 13,5 en de juiste additieven dioxinen omgezet worden naar onschadelijke elementen. De meeste anionen kunnen niet chemisch gefixeerd worden, behalve sulfaten en sulfides.

ADDITIEVEN Er is veel onderzoek gedaan naar het toevoegen van speciale additieven aan het traditionele proces. De eerste categorie additieven heeft tot doel de fysische opsluiting te verbeteren door de cementeringsreactie te optimaliseren. Daartoe kunnen puzzolane materialen worden toegevoegd, zoals vliegassen. Puzzolane mate-

rialen vereisen een externe calciumbron om de reactie in gang te zetten. De externe calciumbron kan afkomstig zijn van CaCO_3 , CaCl_2 , CaSO_4 .

NaOH en MgOH kunnen eveneens gebruikt worden om de hydratatie reactie te optimaliseren. Ook kan calciumaluminaat toegevoegd worden, waarmee zouten reageren tot ettringiet. Dit heeft zowel de opsluiting van de zouten als de extra vorming van ettringiet tot gevolg.

De tweede categorie additieven wordt toegevoegd om anorganische elementen die gemakkelijk uitspoelen, chemisch te binden. Voorbeelden hiervan zijn: oplosbare silica's, reductors, oxidators en anorganische elementen waarmee de uitloegbare elementen neerslaan. Als oplosbaar silicaat wordt waterglas ($\text{Na}_2\text{Si}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) gebruikt, waardoor met name amfotere metalen chemisch gebonden worden. Echter, een nadeel hiervan is de afname in volume, waardoor scheurvorming zou kunnen optreden. Reductors en oxidators, zoals Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{4+} en SO_4^{2-} , worden toegevoegd om zouten te laten neerslaan. De REDOX-reactie levert in deze gevallen een minder oplosbaar zout. Een voorbeeld is de oxydatie van Fe(II) naar Fe(III) en de reductie van Cr(VI) naar Cr(III) . Klei wordt toegevoegd om anorganische componenten en vrij water te binden. Een andere functie van klei is het binden van organische elementen. Daarmee is de derde categorie additieven geïntroduceerd, de additieven voor de uitloegbare organische elementen.

De immobilisatie van organische elementen in cementgebonden immobilisatie vereist bepaalde absorberende materialen, zoals actief kool, klei en polymeren. Door het toevoegen van klei worden organische elementen gebonden. De hydroxyl- en carboxylgroepen van de organische verbindingen worden aangetrokken door de Ca^{2+} -ionen. Aromatische organische verbindingen kunnen geabsorbeerd worden aan gelaagd klei. Het klei is daarvoor gemodificeerd met alkylamonium. Het oppervlak heeft niet langer hydrofiele, maar organofiele eigenschappen. Een ander additief is een polymeedispersie. Het polymeer vormt een film in de poriën. Organische elementen die loslaten van de matrix, worden geabsorbeerd aan het polymeer.

EIGENSCHAPPEN AFVAL

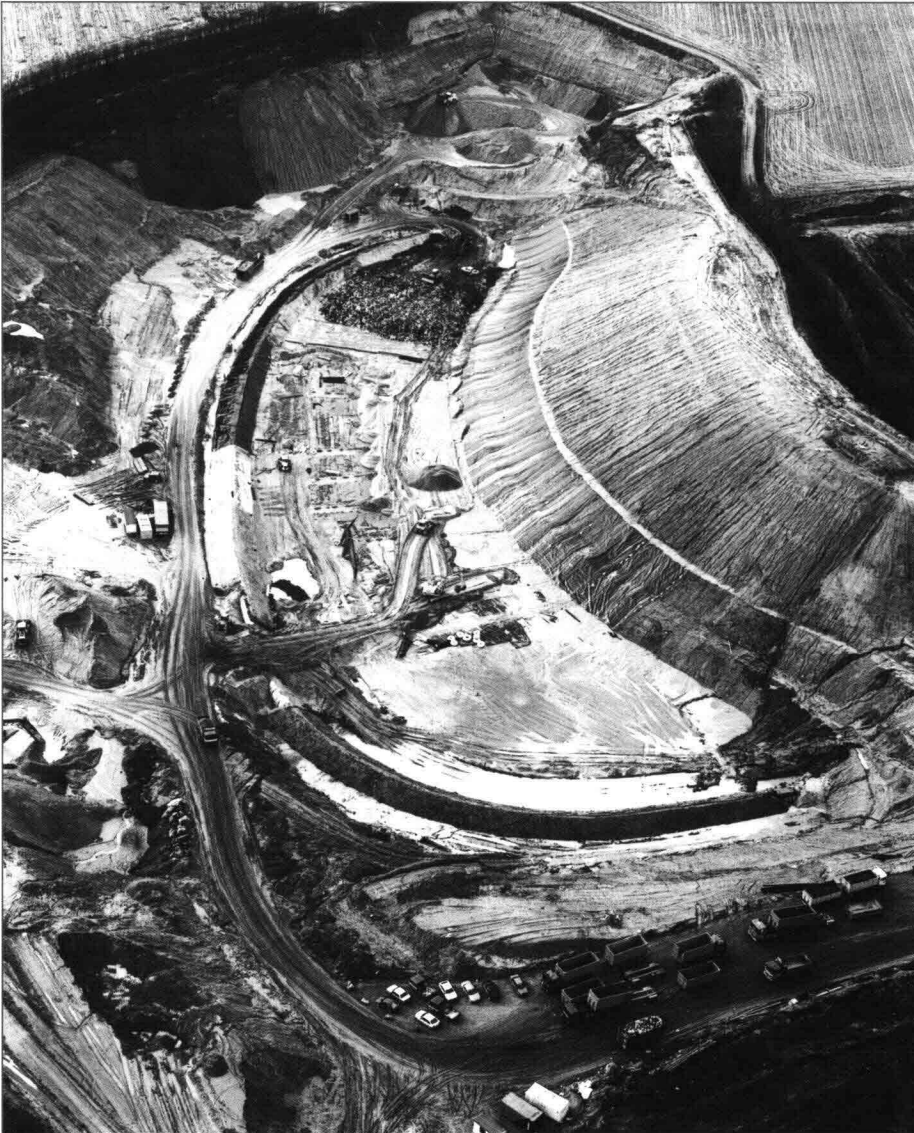
Er is in Nederland ervaring opgedaan met een aantal afvalsoorten. Het afval van verbrandingsinstallaties leverde de volgende resultaten. Drie reststoffen, AVI-vliegas, filterkoek en indampresidu, zijn geïmmobiliseerd. Indampresidu bevat veel zouten en is zodoende niet geschikt gebleken voor cementgebonden immobilisatie. Aangezien filterkoek geen puzzolane werking heeft en goed oplosbaar is, wordt ook voor deze afvalsoort gekeken naar andere verwerkingsmethoden. AVI-vliegas heeft puzzolane eigenschappen en is daardoor wel geschikt. Eventueel kan filterkoek als extra toeslag bij de immobilisatie van AVI-vliegas worden ingezet. Andere afvalstoffen die onderzocht zijn, zijn grondreinigingsresidu, zink-as en (industriële) zuiverings-slib.

Gewenste eigenschappen van de afvalstof zijn:

- een hoog gehalte aan metalen, zoals lood en cadmium;
- een laag organisch stof gehalte, vanwege de benodigde extra additieven;
- een laag gehalte aan bromide, molybdeen, chroom en zink vanwege de mobiliteit van deze elementen;
- een laag gehalte aan vluchtige elementen, zoals kwik.

Niet alleen is de chemische samenstelling van belang, ook de puzzolane activiteit is een belangrijk positieve eigenschap van het afval. Aan de andere kant kunnen kleine deeltjes, kleiner dan $74 \mu\text{m}$, een minder hard product veroorzaken.

DURABILITY Producten van cementgebonden immobilisatie zijn gevoelig voor een aantal degradatiefactoren, overeenkomstig traditioneel beton. Deze zijn: erosie, nat/droog-cycli, vries/dooi-cycli en temperatuurswisselingen. De gevoeligheid voor erosie is afhankelijk van de sterkte van het product. Een hoge sterkte geeft een goede weerstand tegen erosie. De aanwezigheid van nat/droog-cycli kan aanleiding geven tot het zwellen of krimpen van het product en tot het uitlogen van elementen. Met name wanneer gebruik wordt gemaakt van klei, leidt krimp als gevolg van droge perioden mogelijk tot scheurtjes in het materiaal. De mate van krimp wordt voornamelijk bepaald door de W/C-factor. Krimp kan leiden tot scheuren in het product. Echter, de invloed van vocht op scheurvorming is minder dan van vorst/dooi-cycli. Cement is gevoelig voor vorst/dooi-cycli. Door de aanwezigheid van water in de poriën die bevroren bij lage temperaturen, ontstaan spanningen in het immobilisaat. Dit kan leiden tot micro- en



© Bart Holmeester, Aerocamera, Rotterdam

Aanleg van de stortplaats Schinnen-Spaubeek met geotextiel.

macroscheurvorming. Een speciaal geval van vorst/dooi-cycli is de aanwezigheid van doozouten, die de vriestemperatuur verlagen. De concentratie zouten is in het centrum lager dan aan het oppervlak. Als gevolg van concentratie- en temperatuurverschillen bevriezen zowel het centrum als het oppervlak van het immobilisaat. Het geïsoleerde water komt daardoor onder hoge druk te staan. Als polymeren worden toegevoegd aan het cement, kan oxydatie van de polymeren aan het oppervlak plaatsvinden. Ook kan carbonatatie van het cement optreden: onder invloed van koolstofdioxide daalt de pH van het oppervlak van het cement. Aangezien de mobiliteit van zware metalen minimaal is bij een pH tussen de 8 en 11, zie figuur 1, kan hierdoor de immobilisatie geoptimaliseerd worden.

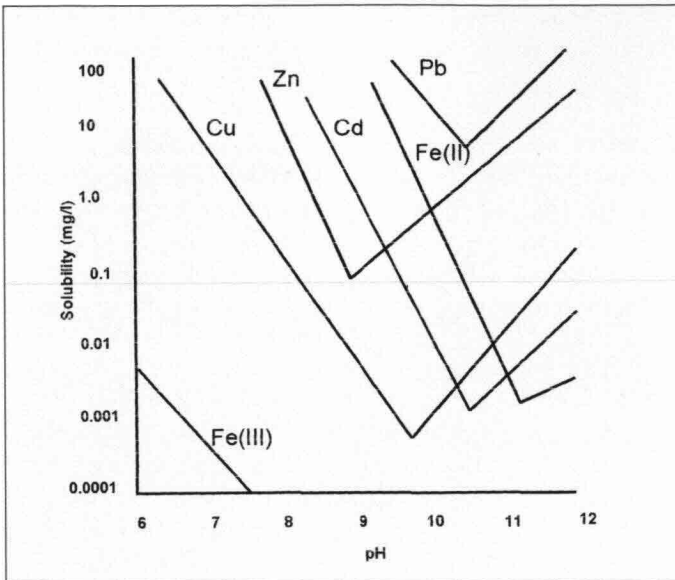
SUSTAINABILITY De duurzaamheid in termen van milieurendement wordt negatief beïnvloed, doordat:

- de primaire materialen die als additieven worden toegepast, soms hoogwaardig zijn;
- in sommige gevallen vindt er veel transport plaats van de afvalproductie, naar de verwerking en naar de bestemming. Door de immobilisatie-installatie naast de verbrandingsinstallatie te plaatsen wordt dit beperkt. Ook een mobiele immobilisatiecentrale beperkt de transportbehoefte.
- een alternatieve verwerking van vliegias en filterkoek, mengen van de afvalstoffen en water, levert mogelijk meer milieurendement. Dit levert namelijk een harde massa met een kleiner volume, dat gestort moet worden, maar wel een betere uitloogkwaliteit heeft dan het afzonderlijke vliegias.

Positieve bijdragen van de verwerking zijn:

- de vervanging van grondstoffen. In sommige gevallen kan het immobilisaat grind en funderingsmateriaal vervangen;
- een tweede positieve bijdrage is triviaal voor immobilisatie, namelijk de vermindering van de uitloging van milieuschadelijke elementen;
- het energiegebruik van de techniek is zeer laag, in vergelijking met thermische immobilisatie. Echter, het gebruik van energie voor de vervaardiging van cement, vrij hoog door de hoge temperaturen, moet ook worden meegenomen;
- in sommige gevallen kan een afname van het stortvolume bewerkstelligd worden (bij een toenemend gewicht), doordat de dichtheid van het geïmmobiliseerde afval groter is dan van het oorspronkelijke afval. Dit betekent een minder groot beslag op stortruimte.

ORGANISCHE IMMOBILISATIE In Nederland bestaat de ervaring met organische immobilisatie vooral uit immobilisatie op basis van bitumen, dat vrijkomt bij de olieraffinaderij. Er is onder andere onderzoek gedaan naar in-situ immobilisatie van zink-as met 6% schuimbitumen. Het behelst een paar kilometer weg. Ook wordt AVI-vliegias als vulmiddel in asfalt toegepast in de praktijk. Het percentage afval is echter gering, ongeveer 2 gewichts%. Verhoging van het gehalte afval is moeilijk vanwege het overschrijden van maximale water en zuuroplosbaarheid van de vulstof. Vijf jaar geleden is een onderzoek gestart naar immobilisatie op basis van styreen. Deze immobilisaten zijn op praktijkschaal getest, maar de uitvoering ervan is gestrand. De producten zullen wellicht toegepast worden onder een andere naam dan immobilisatie. Immobilisatie van gevaarlijk afval kan zowel gebaseerd zijn op thermoplasten als op thermoharders, die verschillende producten leveren.



FIGUUR 1: Oplosbaarheid van metalen als functie van de pH.

THERMOPLASTEN Een veel gebruikte thermoplast is bitumen, dat vrijkomt bij de olieraffinaderij. Ook kan gerecycled plastic gebruikt worden of primaire thermoplasten. Bij immobilisatie op basis van thermoplasten is dus een waste-to-waste-benadering mogelijk. Veel gebruikte thermoplasten zijn: bitumen, polyisobuthyleen, styreen, polyesters, polyurethaan en paraffine. In geval van paraffine is de gewichtsverhouding droge afval/polymeer 1:1 tot 2:1. Bitumen is vloeibaar bij ongeveer 140°C. Afhankelijk van het polymeer wordt een temperatuur aangelegd, tussen de 130°C en 350°C. Het afval wordt continu in het polymeer gepompt bij deze verhoogde temperatuur, waardoor water in het afval verdampt. Door het polymeer en het afval te mengen, ontstaat een homogene massa. Eventueel kan het materiaal getrild worden, zodat de aanwezige lucht uit de matrix verdwijnt. De nabehandeling bestaat uit het afkoelen van het mengsel, waardoor een hard materiaal ontstaat. Op deze manier worden zowel vormgegeven als niet-vormgegeven producten vervaardigd.

THERMOHARDERS Een veel gebruikte thermoharder is ureaformaldehyde. Hieraan kan styreen, een derivaat van de olieraffinaderij, in kleine hoeveelheden worden toegevoegd, 6 tot 7 volume%. Voor immobilisatie op basis van thermoharders is minder fixatiemiddel nodig dan voor de immobilisatie op basis van thermoplasten. De immobilisatie door middel van thermoharders berust op de polymerisatie van monomeren of gedeeltelijk gepolymeriseerde dispersies naar polymeerketens. Daarvoor zijn katalysatoren en/of de invloed van UV-straling vereist. Mogelijke katalysatoren zijn: peroxyde in combinatie met polyesters, polyurethaan en polyacrylaat. Katalysatoren zijn niet alleen nodig om de polymerisatie in gang te zetten, maar ook om bijvoorbeeld het vervluchten van styreen tegen te gaan. Ook zink en lood uit het afval kunnen als katalysator werken. In dat geval is er minder additief nodig. De polymerisatie van monomeren treedt meestal slechts bij een beperkt pH-gebied op. Voor ureaformaldehyde bijvoorbeeld is een pH rond de 1,5 vereist. Het proces wordt bij kamertemperatuur uitgevoerd. De polymerisatie duurt slechts enkele minuten en veroorzaakt een hard product, waarin het

afval wordt opgesloten. Na de verwerking kan deze polymerisatie, en dus de verharding, doorzetten. Er worden zowel granulaten als vormgegeven materialen geproduceerd.

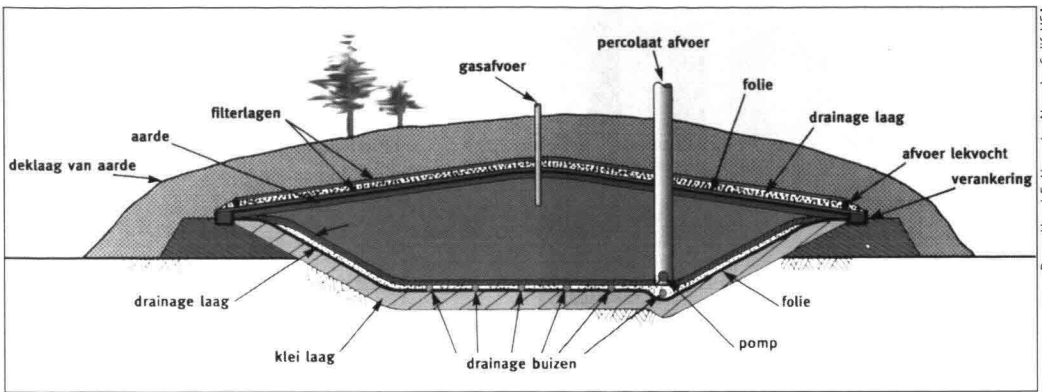
UITLOGING De immobilisatie op basis van polymeren bestaat uit een opsluiting van het afval in de harde matrix, een meso-opsluiting. Als het afval wordt omringd met een ondoordringbare laag, een coating, is er sprake van macro-inkapseling. Meso- en macro-inkapseling is zowel mogelijk met thermoplasten als met thermoharders. Thermoplasten kunnen bovendien een fysisch /chemische binding veroorzaken in de vorm van de adhesie van het afval aan de matrix, een micro-inkapseling. Zware metalen kunnen ingebouwd worden in de polymeerketens, in de vorm van cyanaten, carbiden of nitriden. Er vindt geen chemische binding plaats tussen afval en polymeer. Organische immobilisaten hebben een hoge impermeabiliteit ten opzichte van cementgebonden immobilisaten door het hydrofobe karakter van het materiaal en de afwezigheid van poriën. Zelfs als het materiaal sterk wordt verkleind, is het redelijk bestand tegen uitloging. Uitloging van elementen wordt vooral veroorzaakt door het afspoelen van materiaal aan het oppervlak. Bij thermoplasten is er een initiële verhoogde uitloging van makkelijk oplosbare anorganische elementen en in geringere mate van oplosbare organische elementen. Vluchtige elementen, waaronder kwik, kunnen slecht geïmmobiliseerd worden. Het is mogelijk met organische immobilisatie een categorie 1-bouwstof te produceren.

EIGENSCHAPPEN AFVAL Organische polymerisatie is van toepassing op een grote variatie aan afval, dat zowel organische als anorganische elementen bevat. Zowel granulaten als poedervormig afval kan geïmmobiliseerd worden. In het buitenland is vooral radioactief afval onderzocht. In Nederland zijn zink-as en AVI-slakken onderzocht op de immobilisatie met bitumen. Onder andere straalgrit, zeefzanden, brekerzanden, vliegassen, drinkwater residuen, aluminiumoxydes en verontreinigde grond zijn geïmmobiliseerd met thermoplasten. Ondanks de grote toepassingsmogelijkheden voor organische immobilisatie is een aantal eigenschappen van het afval nadelig:

een restrictie voor immobilisatie op basis van thermoplasten is, dat de elementen niet afbreken bij de verhoogde temperatuur. Dit levert namelijk brandgevaar van oxyderende componenten;

- sterke oxydatoren zijn eveneens niet wenselijk, omdat deze elementen door oxydatie de matrix af kunnen breken;
- gedehydrateerde zouten kunnen nadelig zijn, vanwege de rehydratie in contact met water;
- organisch materiaal met een laag moleculair gewicht, hoge dampdruk of hygroscopische eigenschappen geeft vaak een onacceptabel product;
- voor immobilisatie op basis van styreen is een droge stof gehalte van meer dan 92% gewenst. Bij een lager droge stof gehalte is de sterkte van het product geringer, drogen van het afval kan dan gewenst zijn;
- bij thermoharders is de pH van het afval bepalend voor het remmen of activeren van de polymerisatie.

DURABILITY Organische immobilisaten zijn over het algemeen vrij goed bestand tegen fysische en chemische invloeden, behalve tegen oxydatie. Oxydatie is een gevolg van een reactie van de polymeerketens met zuurstof. Hierdoor worden de ketens afgebroken. Deze reactie wordt in sterke mate bevorderd door UV-straling. Vaak treedt ver-



Bron: Henri E. Haxo jr., Alameda, Calif., USA

Opbouw van een moderne vuilnisstortplaats, zoals die tegenwoordig in veel westerse landen wordt aangelegd.

brossing op. Erosie kan er vervolgens toe leiden dat het geoxydeerde laagje sneller verdwijnt. In mindere mate kan het immobilisaat aangetast worden door de aanwezigheid van water of andere vloeistoffen. Een lichte zwelling en uitloging van oplosbare elementen is mogelijk. Op bitumen gebaseerde immobilisaten kennen een langzame diffusie van water in het asfalt. Als hygroscopische zouten aanwezig zijn, vormt het hydraten, waardoor de osmotische druk in het afval wordt verhoogd. De immobilisaten zwellen en kunnen uiteindelijk uit elkaar vallen. Immobilisaten zijn over het algemeen slecht bestand tegen organische oplosmiddelen, zoals butadieen, diethylether, dichlorobenzene en trichloroethaan. De aanwezigheid van zuren en metallische zouten daarentegen levert weinig problemen op.

Tot slot zijn immobilisaten in meer of mindere mate bestand tegen bacteriën en hoge temperaturen. Sommige thermoharders zijn biologisch afbreekbaar, terwijl thermoplasten wel goed bestand zijn tegen microbiële afbraak. Thermoplasten zijn gevoelig voor brand, in tegenstelling tot thermoharders.

SUSTAINABILITY De immobilisatie op basis van organische bindmiddelen kan op een aantal punten een positieve bijdrage leveren aan milieuhygiëne. Ten eerste wordt door de immobilisatie de uitloging van zware metalen en organische verontreinigingen sterk verminderd. Door een mogelijke nuttige toepassing wordt bovendien het beslag op stortruimte verminderd. Ten derde kunnen de producten het gebruik van primaire grondstoffen tegengaan. Ten vierde is het mogelijk bij immobilisatie op basis van thermoplasten, afval als bindmiddel in te zetten, een waste-to-waste-benadering. Dit afval is bijvoorbeeld afkomstig van plastic flessen. Ten slotte kan er een volume verkleining optreden, doordat het polymeer een hogere dichtheid heeft dan de monomeren. Nadelige invloeden voor het milieu zijn de uitstoot van componenten tijdens het proces en het gebruik van energie. Na de polymerisatie van het bindmiddel kan water op het oppervlakte van de vaste stof blijven staan. Dit water moet afgevoerd en eventueel gereinigd worden. Door de verhoogde temperatuur bij het gebruik van thermoplasten kunnen vluchtige elementen verdwijnen. Deze moeten afgevangen worden. Ook bij het gebruik van thermoharders kunnen zeer schadelijke gassen vrijkomen. De energiebehoefte van het proces bestaat vooral uit het verhogen van de temperatuur voor het smelten van het polymeer of het drogen van het afval. Temperaturen tussen kamertemperatuur en 350°C zijn vereist.

THERMISCHE IMMOBILISATIE In Nederland is vanaf 1989 ervaring opgedaan met het sinteren van baggerspecie klasse IV. Dit resulteerde in grind, dat nooit commercieel is geworden. Daarna is overgegaan op het smelten van baggerspecie in contact met Japan, waar het smelten en verglazen van zuiveringsslib operationeel is. In beginsel werd uitgegaan van oxyderend smelten. Nu wordt vooral het reducerend smelten van complexe afvalstoffen onderzocht. Er is een project uitgevoerd, waarin 300 ton kristallijne producten zijn geproduceerd.

Voordat het afval wordt gesmolten, is een aantal voorbereidingen nodig. Als het afval zand en grove bestanddelen bevat, kunnen deze verwijderd worden om het afval te concentreren. Daarna wordt het afval mechanisch ontwaterd, als het droge stof gehalte lager is dan 50%, en daarna thermisch of door pyrolyse gedroogd tot een droge stof gehalte van 85%. Voor kristallisatie van het afval is de basaltsamenstelling relevant. Om de goede samenstelling te krijgen worden daarom additieven, meestal afvalstoffen, toegevoegd. Papierafval, industrieel afval of vliegassen kunnen het benodigde calciumoxyde leveren, asbest de benodigde magnesiumoxyde en mineraal slib bevat siliciumoxyde. Ook kunnen resten van batterijen worden toegevoegd. Bij het verglazen van afval kan eventueel de toevoeging van natrium-, borium- of aluminiumoxyde nodig zijn. Voor het thermisch immobiliseren van vliegassen is een extra voorbehandeling vereist. Vanwege de oppervlaktespanning van het afval blijft het as op de smelt liggen. De voorbehandeling bestaat uit het aanleggen van een druk.

Het voorbehandelde afval wordt in een oven gevoerd en verwarmd tot de gewenste temperatuur. Voor verglazen en kristalliseren ligt deze tussen de 1400°C en 1500°C, voor sinteren tussen de 800°C en 1150°C. Eigenschappen van het verglaasde en kristallijne product worden bepaald door de smeltcondities, reducerend of oxyderend. Reducerend smelten wordt bereikt door het toevoegen van koolstof. Dit kan in de vorm van shredder afval of door pyrolyse van organische afvalstoffen. In sommige gevallen is het afval van zichzelf reducerend. Daarnaast kan ook gas worden bijgestookt. Door de reducerende omstandigheden worden metaaloxiden, zoals Fe_2O_3 , omgezet naar metalische elementen, Fe. Oxyderende omstandigheden ontstaan door extra lucht of zuiver zuurstof toe te voegen. Ook kan Na_2SO_4 worden gebruikt. De metalen worden als oxyden opgenomen in het verglaasde of kristallijne materiaal.

De nabehandeling van het afval bestaat uit de afkoeling van het materiaal. Een snelle afkoeling levert een glasachtig product. Een mogelijkheid is de smelt onder te dompelen in een bak koud water, waardoor verglaasde granulaten en stoom ontstaan. Ook het besproeien van het materiaal is een mogelijkheid. In Nederland wordt voornamelijk gecontroleerd afgekoeld, waardoor een kristallijn materiaal ontstaat. Een stolling van ongeveer 3 uur is vereist bij temperaturen tussen de 800°C en 1400°C. De temperatuur is afhankelijk van het afvalmengsel. Sommige metalen vormen bij hogere temperaturen kristallijn materiaal in de vorm van oxyden. De kristallisatie duurt in dat geval minder lang, doordat de gekristalliseerde kiemen aangroeien. Behalve uit het afkoelen bestaat de nabehandeling uit het bewerken van de reststromen. Tijdens het drogen van het afval ontstaat een rookgas met vluchtige organische elementen en waterdamp. In geval van reducerend smelten ontstaat bovendien een metaalcontraat van voornamelijk zink en lood. Deze elementen kunnen eventueel worden gerecycled of moeten worden gestort.

UITLOOGKWALITEIT Onder reducerende omstandigheden worden sommige elementen niet in het product opgenomen. Elementen met een laag kookpunt, zoals cadmium en lood, vervluchtigen. De uitloogkwaliteit voor deze elementen van het product is daardoor gunstig. Silicium, aluminium en calcium worden niet uitgedreven en zijn aan-

wezig in het keramische, glasachtige of kristallijne materiaal. De gevoeligheid van deze elementen voor uitloging wordt bepaald door de opname in het rooster. Als een element niet in het rooster past, zoals koper, wordt het tijdens de verglazing, die vanuit het midden begint, naar buiten gedreven. Het glasachtige product kent aan de buitenkant daardoor een verhoogde concentratie van elementen die gemakkelijk uitspoelen. De meeste elementen worden overigens wel opgenomen in het rooster. De uitloging van koper en zink bijvoorbeeld kan voldoen aan de eisen voor categorie 1-bouwstoffen, maar is wel pH afhankelijk. Onder aanwezigheid van zuurstof oxydeert het relatief immobiele chroom (III) naar het veel mobielere chroom (VI). De uitloging van chroom is in sommige gevallen groter voor het keramische product dan voor het afval. Onder zowel reducerende als oxyderende condities worden sulfaten boven een temperatuur van 800°C voor een deel afgebroken. De achtergebleven sulfaten logen onder reducerende gemakkelijk uit. De afbraak van chloride is afhankelijk van de condities. Onder reducerende condities blijft de concentratie gelijk, maar door het toevoegen van zuurstof kan de concentratie afnemen met 30%. Hoge concentraties zouten, chloride, fluoride en sulfaten, kunnen interfereren met het verglazingproces en vereisen daardoor de toevoeging van extra additieven. Hoewel de uitloekwaliteit van kristallijne materialen beter is dan van glasachtige materialen, blijft de uitloging van vanadium, koper, antimoon en arseen een probleem. Het kristallijne materiaal kan opgewerkt worden tot een categorie 1-bouwstof. Hoewel het keramische materiaal poriën bevat, zijn de elementen beter opgesloten in de kristalstructuur dan in de structuur van het smelt/kristallijne materiaal.

EIGENSCHAPPEN VAN AFVAL Er is onderzoek gedaan naar het sinteren van baggerspecie klasse IV. Het baggerspecie bevat voldoende klei-achtige materiaal om een keramisch product op te leveren. Het smelt/kristallisatie proces is toegepast op gevaarlijk afval met minerale en organische verontreinigingen, zoals grondreinigingsresidu, zeefzandreiniging, baggerspecie klasse IV en rioolwaterzuiveringslib. Als additieven worden vliegassen en industriële afvalstoffen, asbest en batterijen genoemd. Een voorbeeld is het smelten van 60% baggerspecie met 40% vliegas/zuiveringslib, aangezien baggerspecie te weinig calcium- en magnesiumoxyde bevat. Verglazingstechnieken zijn toegepast op onder andere zuiveringsslib.

De gewenste eigenschappen van het afval bestaan vooral uit het gehalte aan de genoemde oxyden van de basaltsamenstelling. Te veel zouten kunnen corrosie geven. Voor de rest worden geen eisen gesteld aan de chemische samenstelling van het afval. Organische verontreinigingen, zoals dioxinen, worden geheel afgebroken tijdens het smelten. De energie die hierbij vrijkomt, kan eventueel ingezet worden voor het smelten. Vluchtige elementen komen in het rookgas terecht. Zware metalen worden geheel opgenomen in het product bij oxyderend smelten. Sommige zware metalen zijn gewenst vanwege de versnelling van het kristallisatieproces.

Het droge-stofgehalte wordt via voorbehandelingen op meer dan 85% gebracht. Afvalstoffen die dit percentage al halen, hebben daardoor de voorkeur. Als het afval reeds is geconcentreerd, is het verwijderen van grove bestanddelen evenmin nodig.

DURABILITY Het kristallijne materiaal is thermodynamisch stabiel dan het glasachtige materiaal. De verglazingstechniek levert een product op dat gevoelig is voor humuszuren, verkrumelen en vorst/dooi-cycli. Een ander nadeel van het glasachtige materiaal is dat het in principe een vloeistof is. Na zeer lange tijd zal het glas gaan uitzakken. Het bovenste laagje van het kristallijne materiaal is gevoelig voor degradatiemechanismen, zoals erosie en nat/droog-cycli. Voor de rest is het materiaal vrijwel resistent.

SUSTAINABILITY De negatieve bijdrage van de techniek aan het milieuprobleem is voornamelijk het energiegebruik. Echter, door de inzet van brandbaar afval wordt minder beslag gelegd op de energievoorraad. Deze wordt zowel bepaald door de voorbehandeling als door de smelt- of sintertemperatuur. Voor sintertechnieken ligt dit energiegebruik lager dan voor het smelten. Bovendien zit er een klein verschil in energiegebruik tussen verglazen en kristalliseren. Een tweede negatieve bijdrage is het vrijkomen van rookgas en eventueel andere afvalstromen bij reducerend smelten. Een positieve bijdrage aan het milieu is ten eerste de reductie van volume. Door het drogen van het afval, het verbranden van organisch materiaal en het verdichten van het afval, is het volume van het product een factor 4 kleiner dan van het onbehandelde afval. Ten tweede kan door het afval te smelten of sinteren een product worden gemaakt dat niet gestort hoeft te worden, maar nuttig toegepast kan worden. Dit levert

| | anorganisch | organisch | thermisch |
|------------------------------------|--|------------------------------|------------------|
| nat/droog- bestandheid | scheurvorming materiaalverlies | geen | geen |
| vorst/dooi- bestandheid | scheurvorming, afschilferen materiaalverlies | geen | materiaalverlies |
| erosie-bestandheid | materiaalverlies | geen ¹ | materiaalverlies |
| oxydatie- bestandheid | geen | verkleuren vorming oxiden | geen |

1. Erosie van organisch materiaal kan wel optreden na aantasting als gevolg van oxydatie.

TABEL 1: Beoordeling van de "durability" per immobilisatietechniek

| | anorganisch | organisch | thermisch |
|----------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
| Energiegebruik | neutraal | negatief/positief ¹ | negatief |
| Grondstoffengebruik | negatief ² | negatief/positief ³ | positief |
| Ruimtebeslag | negatief ⁴ | negatief | positief |
| Emissie | neutraal | neutraal | negatief |

1 Afhankelijk van het verhogen van de temperatuur (thermoplasten) of bewerken bij kamertemperatuur (thermoplasten en thermoharders).
2 Aangenomen dat het immobilisaat gestort moet worden.
3 Afhankelijk van het al dan niet nuttig kunnen toepassen van het immobilisaat.
4 Zie voetnoot 3.

TABEL 2: Kwalitatieve beoordeling van de "sustainability" per immobilisatietechniek

een positieve bijdrage aan het beslag op grondstoffen. Bovendien worden er meestal geen primaire materialen als additieven gebruikt. Ten derde is triviaal dat de thermische immobilisatie van afval bijdraagt aan een vermindering van de uitloging van gevaarlijke elementen.

EEN VERGELIJKING VAN TECHNIEKEN Het beschreven project is bedoeld om overwegingen over immobilisatietechnieken te ondersteunen. Daarom is een vergelijking op durability en sustainability tussen verschillende technieken voor Rijkswaterstaat interessant. Welke techniek scoort op welk aspect van de twee vormen van duurzaamheid? In tabel 1 en 2 is dit weergegeven.

Deze bijdrage heeft een indruk willen geven van ontwikkelingen op het gebied van de beoordeling van sustainability en durability. Deze beoordeling zal echter verder moeten gaan dan duurzaamheid, door ook de financiën en de toepassingsmogelijkheden mee te nemen. Er wordt aan Rijkswaterstaat zodoende kennis geleverd voor een integrale afweging, waarmee een breed algemeen belang gediend kan worden. Hier ligt dan ook de uitdaging voor Rijkswaterstaat: een applicatie van producten vanuit een maatschappelijke acceptatie. We zien het als een uitdaging voor onze eigen afdeling om gefundeerde kennis te leveren voor deze integrale functie van Rijkswaterstaat.

DUBBEL

VERDUURZAMEN VAN

WEGCONSTRUCTIES

Een uitdaging aan wetenschap,
bestuur en uitvoering

A.A.A. Molenaar
13

• • •

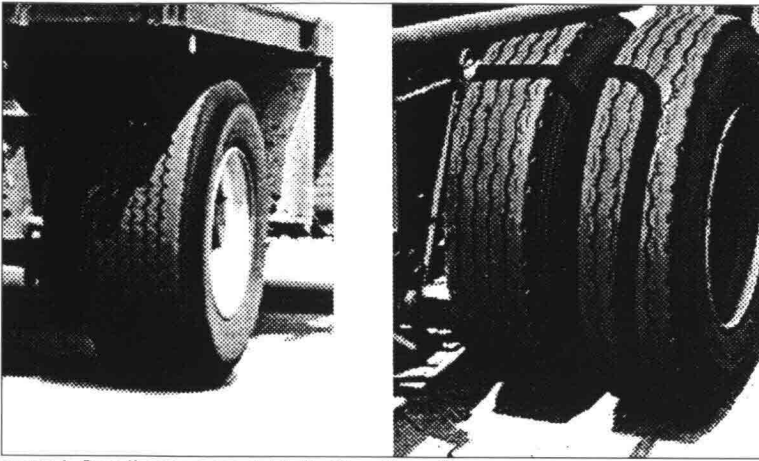
De overheid streeft begrijpelijkerwijs naar duurzame wegcon-
structies. Bedoelt die daarmee dat die wegconstructies
durable (onderhoudsarm) of sustainable (handhaafbaar)
moeten zijn? Of beide? In dit hoofdstuk wordt de twee-eiige tweeling
die duurzaam is uitgewerkt. Ook wordt met voorbeelden geïllustreerd
dat er al veel kennis voorhanden is om duurzame wegconstructies te
kunnen bouwen en aanleggen. Veel onderzoek echter is nog nodig en
het ontbreekt vooral aan een systeembenadering. Waarom is die van
belang en hoe zou deze eruit kunnen zien?

• • •

In de laatste jaren is het begrip 'duurzaam' een ingeburgerd begrip geworden. De vraag is echter of aan het begrip 'duurzaam' altijd dezelfde betekenis wordt gegeven en of het wel altijd op dezelfde manier wordt begrepen. In gesprekken blijkt dat dit vaak niet het geval is. Men zou daaruit kunnen afleiden dat de Nederlandse taal misschien wel tekortschiet om de inhoud van het begrip 'duurzaamheid' met een eenduidige definitie af te dekken. De Engelse taal biedt meer mogelijkheden om de inhoud van het woord 'duurzaamheid' te definiëren.

Daar gebruikt men er twee woorden voor, namelijk 'durability' en 'sustainability'. Het woord 'durability' wordt gebruikt in de sfeer van 'iets concreets, een ding dat lang meegaat, onverslijtbaar en onderhoudsarm is', terwijl het woord 'sustainable' vooral slaat op 'iets wat je kunt handhaven'. Waarbij dat 'iets' dan vooral een abstracte betekenis heeft. Zo spreekt men dan ook bijvoorbeeld over de 'durability of asphalt concrete' en een 'sustainable society'. Als sprake is van duurzame wegconstructies, wordt dan bedoeld 'durability', 'sustainability', of allebei? Het zal de lezer niet verrassen dat in dit verband beide betekenissen worden bedoeld.

DUURZAAM EN DUURZAAM, EEN TWEE-EIIGE TWEELING Als wordt gesproken over duurzaamheid heeft men het eigenlijk over twee begrippen. 'Durable' en 'sustainable' lijken veel op elkaar en hebben ook wel veel met elkaar te maken, maar betekenen niet hetzelfde. In die zin kun je 'durable' en 'sustainable' de twee-eiige tweeling 'duurzaam



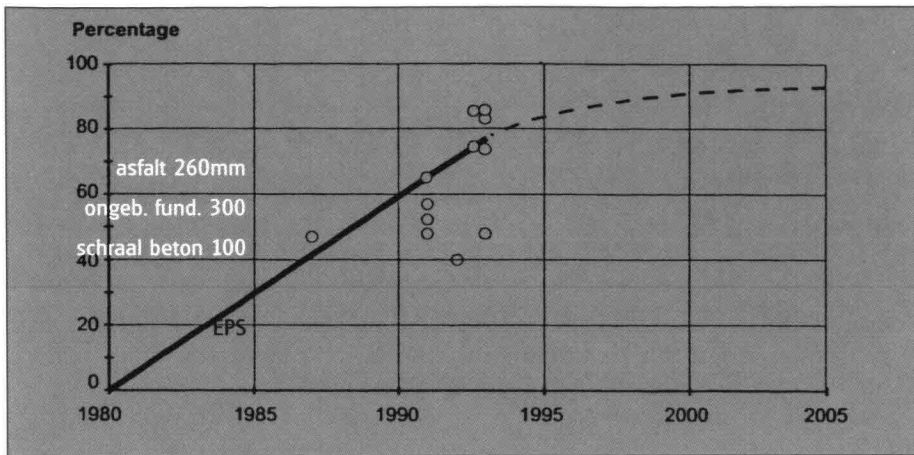
FIGUUR 1: Breedband versus dubbelluchtconfiguratie.

en duurzaam' noemen. Laten we nu eens beschrijven hoe die tweeling eruit ziet als het gaat over wegconstructies.

Het hoofdwegennet in vele delen van Nederland is zwaar belast. Niet alleen de verkeersintensiteiten zijn plaatselijk zeer hoog, ook de belastingen zijn groot. Teneinde de hinder voor de weggebruiker zoveel mogelijk te beperken, wordt het onderhoud aan het hoofdwegennet veelal 's nachts uitgevoerd. Het is dan ook logisch dat de overheid streeft naar verhardingen die slechts in beperkte mate onderhoud behoeven. Zo dienen wegconstructies zodanig te worden gedimensioneerd dat geen schade optreedt in de dieper gelegen lagen van de constructie. Alleen onderhoud aan de deklaag dat snel is uit te voeren, is acceptabel. Het is duidelijk dat deze randvoorwaarden bijzondere (technische) eisen met zich meebrengen voor te gebruiken materialen en constructies. Ze moeten duurzaam en onderhoudsarm zijn. Daarbij moet worden geanticiperd op de toekomst en bijvoorbeeld rekening worden gehouden met een toename van het treingewicht van de vrachtauto's, een toename van de wielbelasting en bandspanning en een verdergaande introductie van de zogenaamde breedband (zie figuren 1 en 2), ook op de aangedreven assen. Betoogd wordt immers [1,2] dat deze ontwikkelingen kostenbesparend zijn voor de transportsector, dat de besparingen vele malen groter zijn dan de extra kosten aan de infrastructuur die als gevolg van deze zwaardere belastingen moeten worden gemaakt, en dat ze ook gunstig zijn voor het milieu, want het brandstofgebruik en de 'productie' van oude banden zouden afnemen.

Wielbelasting is bij de breedband tweemaal zo hoog als bij een dubbellucht. Bandspanning is bij een breedband 800 à 850 kPa, bij een dubbellucht is dat 700 kPa.

Aan de eisen met betrekking tot de duurzaamheid van deklagen kan worden voldaan door bijvoorbeeld toepassing van teer als bindmiddel. Dit is in het verleden ook gebeurd, maar tegenwoordig is dit om milieutechnische redenen verboden. Hiermee komen we op de duurzaamheidseisen die in de zin van 'sustainability' aan wegconstructies worden gesteld. De materialen en de constructie zelf dienen een zo gering mogelijke belasting van de directe omgeving en van het milieu in meer algemene zin op te leveren. Dit impliceert bijvoorbeeld dat het wegsysteem een zo laag mogelijk geluidniveau dient te produceren, dat de materialen en de constructie de grond en het grondwater zo weinig mogelijk belasten, en dat bij onderhoud de vrijkomende materialen weer kunnen worden hergebruikt. De noodzaak tot de bouw van 'sustainable' con-



FIGUUR 2: Toename in de tijd van het gebruik van de breedband.

structies impliceert echter ook, dat gekeken moet worden naar de energiebehoefte van de productieprocessen van de verschillende materialen en constructies en naar de behoefte aan natuurlijke grondstoffen. Bovendien moet er rekening mee worden gehouden dat het hergebruikte materiaal op een zeker moment weer eens hergebruikt moet worden. De vraag is dan hoe je dat op een milieuvriendelijke wijze kunt doen met behoud van de gewenste technische eigenschappen. Uit dit overzicht is duidelijk dat het begrip 'duurzame wegconstructie' niet alleen de constructief technische kant afdekt, maar ook een zeer sterke milieutechnische component heeft.

CONSTRUCTIEFTECHNISCHE DUURZAME WEGCONSTRUCTIES Met wegconstructies die in constructief technisch opzicht als duurzaam kunnen worden beschouwd, worden in feite onderhoudsarme wegconstructies bedoeld. Nu is het begrip onderhoudsarm vooral in het westen van het land een betrekkelijk begrip. De grondslag heeft er zo weinig draagkracht dat grote zettingen en zettingsverschillen ontstaan, waardoor de wegconstructie na zo'n 15 jaar niet meer goed onder profiel ligt en er onderhoud moet worden uitgevoerd. Onderzoek dat aan de TU Delft is uitgevoerd [3], en waarin Rijkswaterstaat heeft geparticipeerd, heeft echter aangetoond dat zeer goede constructies kunnen worden gebouwd, waarbij 'piepschuim' als zeer licht ophoogmateriaal wordt gebruikt ($\gamma = 15$ à 25 kg/m^3), maar waarbij aan de constructieopbouw bijzondere eisen worden gesteld. Daar het schuim een zeer lage stijfheid ($E = 5$ à $10 \text{ Megapascal, MPa}$) heeft, dient het te worden afgedekt met een stijve laag, zoals schraal beton.

Opgemerkt wordt dat de schrale betonlaag tevens als fundering kan dienen voor wegmeubilair, zoals portalen en verlichting.

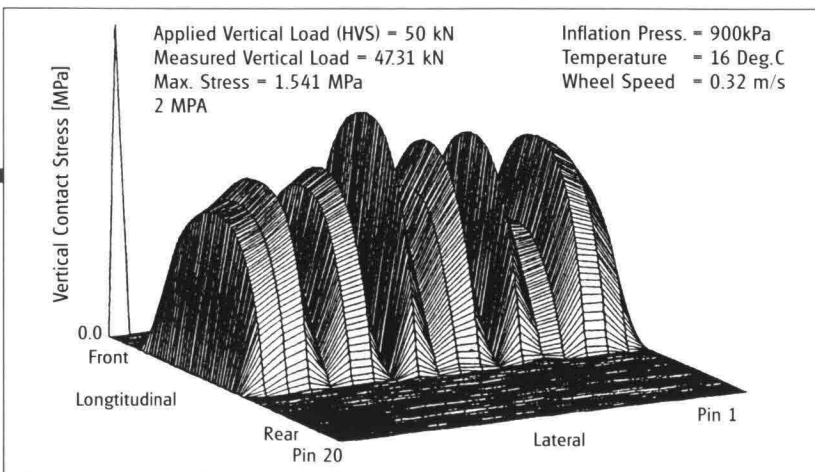
Aan de bitumineuze verhardingslagen kan een lange levensduur worden gegeven door toepassing van gemodificeerde bindmiddelen. Onderzoek dat aan de TU Delft is uitgevoerd voor de werkgroep 'Zwaar Belaste Verhardingen' [4] en waaraan Rijkswaterstaat meewerkte, heeft onder andere aangetoond dat de weerstand tegen blijvende vormveranderingen (spoorvorming in de volksmond) geweldig kan worden verbeterd door toepassing van bijvoorbeeld styreenbutadieenstyreen (SBS)-modificatie van het bindmiddel. Deze grote vervormingsweerstand is inderdaad nodig, omdat in het Rotterdamse havengebied aslasten van 260 kN (26 ton!) zijn gemeten en omdat de spanningen in het contactvlak bandwegdek zeer aanzienlijk kunnen zijn. Tot voor kort werd ervan uitgegaan

dat de verticale contactspanningen als min of meer gelijkmatig verdeeld konden worden aangenomen en dat de hoogte ervan gelijk zou zijn aan de bandspanning. Niets is echter minder waar. Onderzoek dat de TU Delft en Rijkswaterstaat hebben uitbesteed aan Zuid-Afrika omdat daar de benodigde apparatuur beschikbaar was, heeft geleerd dat de contactspanningen in hoge mate ongelijkmatig zijn verdeeld en dat hoge piekspanningen op kunnen treden [5]. Een en ander is weergegeven in figuur 3.

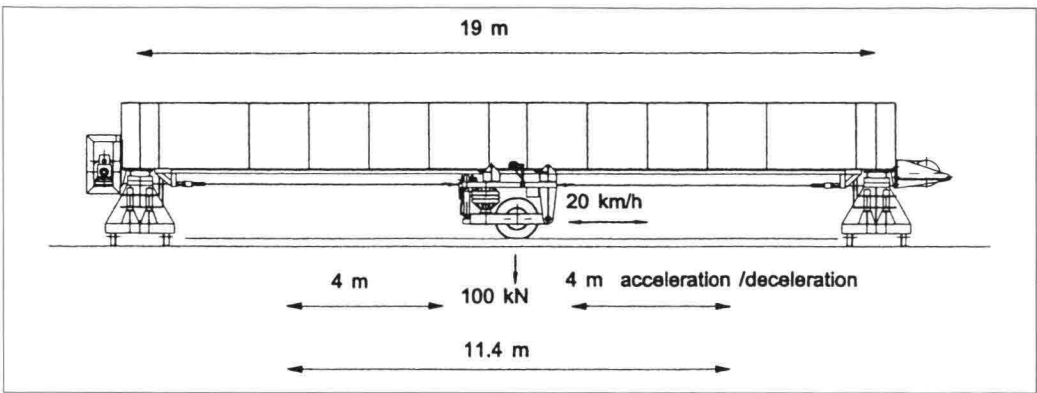
Er bestaan dus diverse mogelijkheden om de onderhoudsbehoefte van verhardingen te verminderen. Onderhoudsvrij zal een wegconstructie echter nooit kunnen zijn. Kan nu ook het onderhoudsmoment van wegconstructies met een hoge mate van nauwkeurigheid worden voorspeld? Als dat het geval is, kan immers het effect van voorgestelde verbeteringen nauwkeurig worden voorspeld.

Hoe staat het nu met de voorspellingskracht van de thans gebruikte modellen? Het is spijtig om te moeten constateren dat die niet optimaal is. Voor een deel heeft dat te maken met het feit dat vaak te grote schematiseringen worden aangebracht in de belasting (hiervoor al aangegeven) en het materiaalgedrag. Veelal wordt uitgegaan van lineair elastisch gedrag, terwijl in werkelijkheid wegebouwmaterialen een hoge mate van niet-lineariteit en viscoelastoplastisch gedrag vertonen. Onderzoek dat door de TU Delft, samen met Rijkswaterstaat, wordt uitgevoerd aan het gedrag van wegverhardingen met behulp van de LINTRACK, een apparaat waarmee reële constructies versneld aan zware wiellasten kunnen worden blootgesteld (zie figuur 4), heeft onmiskenbaar aangetoond dat nog het nodige werk moet worden verricht aan de modellering van het gedrag van materialen en constructies. Een fenomeen dat nog veel onderzoek vereist, is bijvoorbeeld het zelfherstellend vermogen, ook wel *healing* genoemd, van asfaltverhardingen. Tijdens rustpauzes tussen lastpulsen herstelt zich een deel van de opgetreden schade, een effect dat meetbaar is door de afgenomen rekken en doorbuiging van constructies na een belastingvrije periode.

De grootste oorzaak in de *mismatch* tussen theorie en praktijkgedrag, ligt echter in de grote spreidingen en variaties die optreden. Een deel daarvan is bekend en wordt zelfs in de specificaties toegelaten. Een ander deel is weliswaar in kwalitatieve zin bekend, maar laat zich moeilijk kwantificeren. Gedoeld wordt hier op lastig te voorspellen invloedsfactoren als klimaat en verkeer en de invloed van uitvoeringscondities. Laten



FIGUUR 3: Toename van de blijvende vormverandering ϵ_p in asfalt als functie van het aantal lastherhalingen N bij een temperatuur van 50°C .

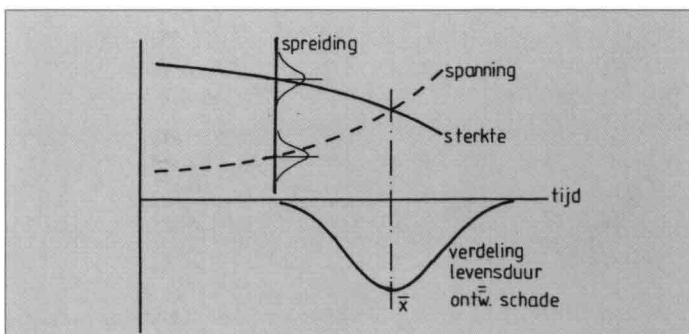


FIGUUR 4: De LINTRACK.

we eerst eens kijken naar de consequenties van die spreidingen. In figuur 5 is schematisch aangegeven hoe de ontwikkeling van schade op een wegvak verloopt als functie van de optredende spanningen en de sterkte van de materialen.

Uit figuur 5 blijkt dat het moment waarop de eerste schade wordt geconstateerd, wordt bepaald door de gemiddelde spanning en de gemiddelde sterkte, maar vooral ook door de optredende spreidingen. Uit onderzoek is gebleken dat vooral de spreiding in sterkte van belang is. Een voorbeeld. Het is bijvoorbeeld bekend dat de vermoeiingslevensduur van een bepaald in het laboratorium vervaardigd asfaltmengsel met een factor 5 kan variëren. Dit betekent dus dat bij een bepaald spanningsniveau het ene proefstuk vijfmaal zoveel lastwisselingen kan hebben dan een ander proefstuk. De variatie in vermoeiingslevensduur van proefstukken die uit een bepaald wegdek zijn genomen, kan wel een factor 8 zijn. Populair gesteld betekent dat op een plek reeds na twee jaar schade zichtbaar is, terwijl pas na zestien jaar de gehele constructie is bezweken. Het zal duidelijk zijn dat als de weg voor een bepaalde periode onderhoudsvrij moet zijn, dit alleen kan worden gerealiseerd door overdimensionering.

Omdat dat een relatief kostbare oplossing is, dringt zich de vraag op of de spreidingen niet kunnen worden beperkt. Je zou bijvoorbeeld kunnen stellen dat de grote spreiding op de weg het gevolg is van een grotere variatie in de samenstelling van de mengsels in de praktijk, vergeleken met mengsels die in het laboratorium zijn vervaardigd. De vraag is dan waardoor dat komt? Is dat het verschil in menging en verdichting, speelt transporttijd een rol, wat is de invloed van het weer en wat is de invloed van de werk-



FIGUUR 5: Schematische weergave van de schade-ontwikkeling op een wegvak.

sfeer? Je zou je ook kunnen afvragen of de specificaties voor de mengselsamenstelling niet te ruim zijn, waardoor te grote variaties ontstaan. Als men de spreiding in de levensduur wil beperken, zal men dus met alle deze facetten rekening moeten houden. Toepassing van de probabilistiek en het kwantificeren van de invloed van verschillende factoren op de kwaliteit en de spreiding daarin, staan echter nog in de kinderschoenen en zijn zeker gebieden waar nog veel onderzoek nodig is.

MILIEUTECHNISCH DUURZAME VERHARDINGEN Het is al eerder gesteld dat een wegconstructie behalve constructief-technisch ook milieutechnisch duurzaam moet zijn. De gebruikte materialen mogen niet milieubelastend zijn en dienen blijvend herbruikbaar te zijn. Ook dient de behoefte aan natuurlijke bouwstoffen te worden geminimaliseerd en dient de behoefte aan energie beperkt te blijven. Deze eisen, gecombineerd met die welke samenhangen met een hoogwaardige technische kwaliteit, kunnen tot conflicterende situaties leiden. Aan de hand van een paar voorbeelden wordt dit geïllustreerd. Het eerste voorbeeld behelst de bereiding van asfalt. Voor de bereiding van warm asfalt is energie nodig. De meest gebruikelijke bronnen zijn gas of olie, maar ook energie in de vorm van microgolven wordt gebruikt. Met name de laatste vorm is zeer interessant, omdat daarmee de uitstoot van gas en stof sterk wordt beperkt. Het grote nadeel is echter dat de benodigde 'schone' elektriciteit wel ergens opgewekt moet worden en daar dus uitstoot veroorzaakt. De vraag is dan of bereiding van asfalt met het microgolf-principe in totaliteit gezien dan nog wel zo milieuvriendelijk is, als in eerste instantie wordt gedacht.

Het tweede voorbeeld behelst het hergebruik van materialen. Het bouwstoffenbesluit lijkt nogal streng als het gaat om de toepassing van allerlei restmaterialen in wegfuncties en ophogingen. Met name geldt dat de kans op uitloging van kwalijke stoffen moet worden geminimaliseerd. Het is duidelijk dat uitloging alleen mogelijk is als er sprake is van transport van vocht. Juist omdat hier zo weinig van bekend is, vindt op dit moment bij de TU Delft onderzoek plaats op dit onderwerp, onderzoek waarin Rijkswaterstaat participeert. Als transport van vocht in een wegconstructie zeer beperkt is, zouden de mogelijkheden voor toepassing van restmaterialen mogelijk kunnen worden verruimd. Een ander voorbeeld dat betrekking heeft op hergebruik is het volgende. Tegenwoordig wordt gestreefd naar een zo hoog mogelijke vorm van hergebruik. Dit betekent dat men ernaar streeft warm asfalt weer als warm asfalt te hergebruiken. De vraag is echter of dit zo maar kan. Na herhaald hergebruik zullen immers stevige modificaties nodig zijn om het 'oude dorre' asfalt weer 'nieuw leven in te blazen'. En bezien moet worden welke consequenties dit heeft voor het milieu. Wordt toekomstig hergebruik er bijvoorbeeld niet onnodig lastig mee gemaakt? Zou het, gegeven dit probleem, niet verstandiger zijn om over te gaan op een andere vorm van hergebruik, zoals koud hergebruik? Onderzoek uitgevoerd door het bedrijfsleven, vaak samen met de TU Delft, heeft aangetoond dat stabilisatie van gebroken asfalt, ook teerhoudend asfalt, met een mengsel van emulsie en cement tot een in milieu- en constructie technisch opzicht zeer goed materiaal kan leiden.

Dit alles geeft aan dat het tijd wordt om de bouw van 'durable' en 'sustainable' wegconstructies via een systeembenadering aan te pakken. Zo zal, voor iedere situatie waar een duurzame verhardingsconstructie nodig is, moeten worden gedefinieerd wat in dat specifieke geval nu eigenlijk wordt bedoeld met duurzaam. Er moet dus worden nagegaan wat de constructieve en milieutechnische randvoorwaarden zijn, waaraan de constructie moet voldoen. Daarna moet worden nagegaan met welke materialen de constructie kan worden gebouwd en wat de mogelijke constructievormen zijn. De uiteindelijke keuze wordt bepaald door een afweging van de gewenste levensduur, de

aard van het toe te laten onderhoud, onderhoudsfrequentie, milieubelasting door de te gebruiken materialen en constructievorm, herbruikbaarheid, energiebehoefte voor de aanleg van de constructie en de productie van de bouwstoffen, behoefte aan natuurlijke grondstoffen en ten slotte, maar niet geheel onbelangrijk, de kosten.

Een mooi voorbeeld van waar zo'n systeembenadering nodig is, is de vijfde baan voor Schiphol. Door haar relatief gunstige ligging zal deze baan veel gebruikt worden om de geluidsoverlast binnen het toelaatbare te houden. Schiphol wil de gebruikszekerheid van de baan maximaliseren en wenst daarom een constructie met een geringe onderhoudsbehoefte. Alleen onderhoud aan de deklaag, 'het behang', is toegestaan. Bovendien geldt dat voor het zogenaamde behangonderhoud slechts twee weken per jaar beschikbaar zijn. Dat is echter niet noodzakelijk een aaneengesloten periode. De invulling van deze periode hangt af van de operations. Het komt er dus op neer dat 's nachts gewerkt moet worden en dat tijdens deze perioden de baan niet 'aanvliegbaar' is. Ook geldt dat het bij de grootschalige **upgrading** van Schiphol vrijkomende bouwpuin moet worden hergebruikt. Inclusief het vrijkomende asfalt, dat soms teerhoudend kan zijn in verband met het materiaal dat vroeger werd toegepast voor de anti-skidlagen. Kortom, een complex probleem, waarbij de nodige afwegingen moeten worden gedaan, terwijl de daarvoor benodigde integrale afweegtechniek eigenlijk niet bestaat. Het is dan ook in dit kader dat in het onlangs bij de TU Delft gestarte DIOC-project 'De Ecologische Stad', onderzoek is gestart naar de ontwikkeling van zo'n integraal afwegingsmodel. Ook hierbij is Rijkswaterstaat betrokken.

TENSLOTTE Hiervoor is beschreven welke aspecten aan de orde komen bij het ontwerp en de bouw van duurzame wegconstructies. Duidelijk is dat het gaat om een groot aantal factoren van constructief Technische en milieutechnische aard. Beschreven is wat voor onderzoek al is uitgevoerd om de bouw van dit soort constructies mogelijk te maken en op welke gebieden onderzoek absoluut noodzakelijk is. Uit de voorbeelden blijkt dat goede samenwerking tussen overheid, bedrijfsleven en universiteit geboden is voor de creatie van de noodzakelijke oplossingen. Het is goed te kunnen constateren dat die goede samenwerking er ook inderdaad is.

NOTEN

- 1 Van Gorp, H.A., Ontwikkelingen in het Wegvervoer., Nederlands Wegencongres 1995, brochure uitgegeven door het C.R.O.W te Ede.
- 2 Vos, E., Breedbanden en Zwaar Verkeer. Rapport PDWW96058; Dienst Weg- en Waterbouwkunde Rijkswaterstaat; Delft 1996.
- 3 Duskov, M., EPS as a LightWeight Subbase Material in Pavement Structures. Dissertatie TU Delft; Delft - 1997.
- 4 V.B.W.Asfalt; D.W.W.Rijkswaterstaat; BENELUX Bitume, Asfaltconstructies voor Zwaarbelaste Wegen en Wegverbredingen. Breukelen - 1995.
- 5 De Beer, M. (CSIR); Groenendijk, J. (TU Delft); Fisher, C. (CSIR) Three Dimensional Contact Stresses under the Lintrack Wide Base Single Tyres, measured with the Vehicle Road Surface Pressure Transducer Array (VRSPTA) system in South Africa. Contract Report CR95/056; CSIR; Pretoria 1996.

INNOVATIE

VAN DE GEOMETRISCHE

INFRASTRUCTUUR

**Het Actieve GPS Referentie Systeem
voor Nederland**

P.J.G. Teunissen
14

• • •

In 1991 kwam van de Delftse faculteit Geodesie het voorstel om Nederland uit te rusten met een Actief Global Referentie Systeem (AGRS). Eind 1997 werd het prototype opgeleverd. Dat bestaat uit een netwerk van vijf referentiestations, die elk in directe verbinding staan met het centrale Global Positioning System-rekencentrum in Apeldoorn. Inmiddels staat vast dat het AGRS belangrijk bijdraagt aan de vernieuwing van de nationale geometrische infrastructuur. Volgens het KNMI is het bovendien 'het meest geschikt' voor GPS-waterdampmetingen, iets dat de auteur van deze bijdrage in 1991 - toen hij met het AGRS-voorstel kwam - zelf niet voor mogelijk had gehouden. Zeven jaren na de geboorte van een idee: de ontwikkeling en toepassingen van een nieuw meetsysteem.

• • •

De geometrische vorm van de nationale geodetische infrastructuur - kortweg aan te duiden als de 'geometrische infrastructuur' - dient voor een uniforme en consistente geometrische inpassing van de plaatsbepalingsactiviteiten in Nederland.

De infrastructurele voorzieningen hebben betrekking op de referentiesystemen voor hoogte en situatie, die in onderlinge coördinatie worden onderhouden door Rijkswaterstaat en het Kadaster. De Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat is daarbij verantwoordelijk voor de instandhouding van het nationale hoogtenet op basis van het Normaal Amsterdams Peil, terwijl de Rijksdriehoeksmeting van het Kadaster belast is met het nationale horizontale referentienet.

In toenemende mate wordt bij de verschillende plaatsbepalingsactiviteiten in ons land gebruik gemaakt van ruimtegeodetische technieken, zoals in het bijzonder die van het **Global Positioning System**. De geodetische toepassing van dit systeem maakt zeer nauwkeurige plaatsbepaling mogelijk voor een grote verscheidenheid van gebruikersgroepen. Hierdoor worden nieuwe en hogere eisen aan de geometrische infrastructuur gesteld. Een aantal jaren geleden is daarom besloten de nationale geometrische infrastructuur te moderniseren.



GPS-antenne op een statief tijdens metingen in het veld. Het doosje op de voorgrond bevat de GPS-ontvanger. De kerktoren op de achtergrond wordt daardoor overbodig als referentie voor meetkundige doeleinden.

Het momenteel in ontwikkeling zijnde Actieve GPS Referentie Systeem zal daarbij een belangrijke bijdrage gaan leveren aan de verankering van deze vernieuwde infrastructuur.

HET GLOBAL POSITIONING SYSTEM

GPS-plaatsbepaling Bij de bepaling van de meetkundige figuur van de aarde was men in het verleden hoofdzakelijk aangewezen op het gebruik van terrestrische hoek- en afstandsmetingen. Met de komst van het Global Positioning System, veelal afgekort tot GPS, is daar drastisch verandering in gekomen. Het sinds 1993 volledig operationele GPS bestaat uit een bijna perfect symmetrische constellatie van in totaal 24 satellieten die, verdeeld over zes baanvlakken, op een hoogte van ongeveer 20.000 kilometer hun baantjes om de aarde trekken.

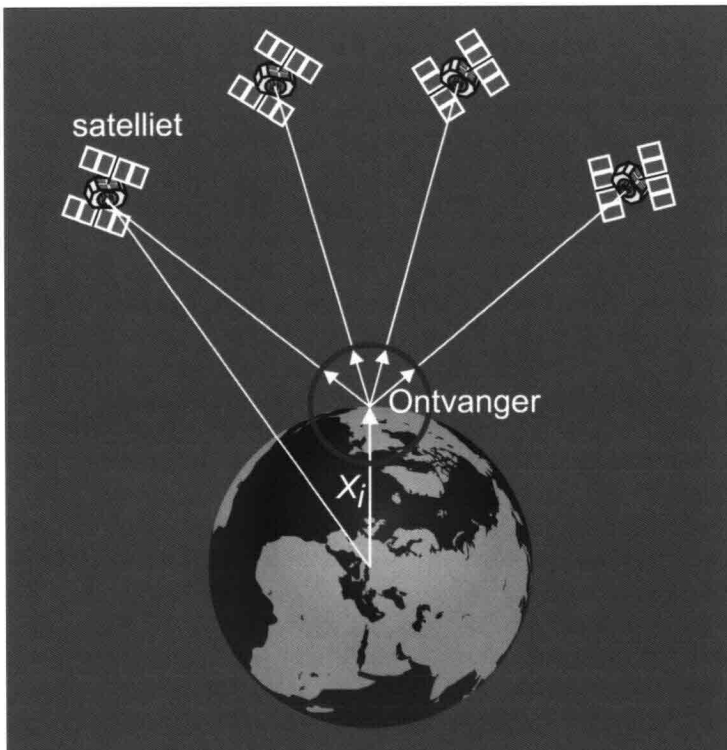
De hoge banen hebben het voordeel dat de satellieten relatief weinig hinder ondervinden van de wrijving van de atmosfeer en van de grilligheden in het aardse zwaartekrachtsveld. De satellietposities zijn hierdoor in de tijd goed te voorspellen, zodat ze voor veel praktische toepassingen als bekend verondersteld mogen worden. De hoge banen maken het, gekoppeld met het aantal satellieten en de gekozen satellietenconfiguratie, tevens mogelijk dat steeds een voldoende aantal satellieten over een groot oppervlak van de aarde simultaan 'zichtbaar' is. Door nu met behulp van een GPS-ontvanger op aarde afstandsmetingen naar een voldoende aantal in positie bekende satellieten te verrichten, is de plaats van de ontvanger in een wereldwijd coördinatenstelsel te bepalen (zie figuur 1).

Nauwkeurige GPS-plaatsbepaling Bij het GPS kunnen twee typen afstandsmeting worden onderscheiden, de looptijdmeting en de fasemeting [1]. Bij het eerste type meting wordt de looptijd gemeten van het door de satelliet uitgezonden signaal.

Vermenigvuldigd met de lichtsnelheid levert dit de afstand tussen satelliet en ontvanger op het moment van meting. Dit type meting is echter vanwege het relatief hoge meetruisniveau minder geschikt voor geodetische toepassingen, waarvoor immers vaak zeer hoge nauwkeurigheidseisen aan de plaatsbepaling worden gesteld.

Het tweede type meting, de fasemeting, is wèl geschikt voor geodetische toepassingen. De fasemeting bestaat uit het meten van het faseverschil tussen het door de satelliet uitgezonden en in de ontvanger gegenereerde signaal. Deze fasemeting kan, op een aantal correcties na, ook als een afstandsmeting naar de GPS-satelliet worden geïnterpreteerd. De hoge meetprecisie van de fasemeting is echter nog niet voldoende om tot een nauwkeurige plaatsbepaling te komen. De door de satellieten uitgezonden signalen zijn namelijk nog behept met een aantal verstoringen als ze door de GPS-ontvanger worden ontvangen. Deze verstoringen zijn onder andere de satelliet- en ontvanger-klokfouten en de vertraging die het signaal ondergaat bij het doorlopen van de atmosfeer. Bij het gebruik van een enkele GPS-ontvanger, ook wel absolute plaatsbepaling genoemd, worden deze onbekende verstoringen direct doorgegeven aan de berekende positie van de ontvanger. In dat geval is er dus nog steeds geen sprake van nauwkeurige plaatsbepaling, ondanks de zeer precieze fasemetingen.

Dit probleem kan nu voor een belangrijk deel worden ondervangen door, in plaats van met een enkele GPS-ontvanger, met twee GPS-ontvangers te werken. Daar beide ontvangers simultaan de uitgezonden signalen van dezelfde satellieten ontvangen, zijn de verstoringen voor beide ontvangers nagenoeg gelijk en worden ze dus voor een belangrijk deel uit het positieverschil, de zogenaamde basislijn, van de twee ontvangers geëlimineerd. Relatieve plaatsbepaling is dus nauwkeuriger dan absolute plaatsbepaling. Door nu één van de twee ontvangers, de zogenaamde referentie-ontvanger, op een in



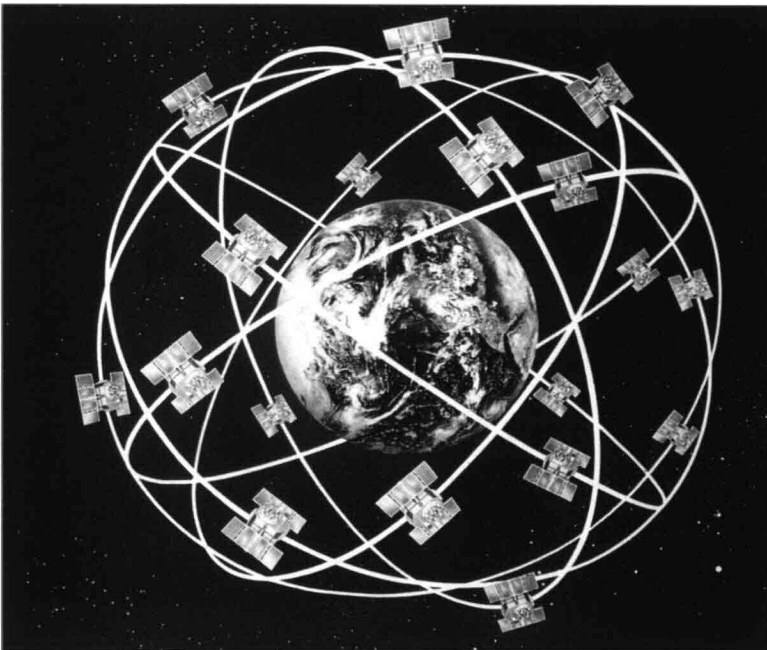
FIGUUR 1: GPS-plaatsbepaling op basis van afstandsmeting.

coördinaten bekend punt op te stellen en de andere ontvanger, de zogenaamde mobiele, achtereenvolgens op verschillende in coördinaten te bepalen punten, kunnen de posities van deze nieuwe punten dus met een hogere nauwkeurigheid bepaald worden, dan mogelijk zou zijn geweest als slechts een enkele ontvanger zou worden gebruikt (zie figuur 2).

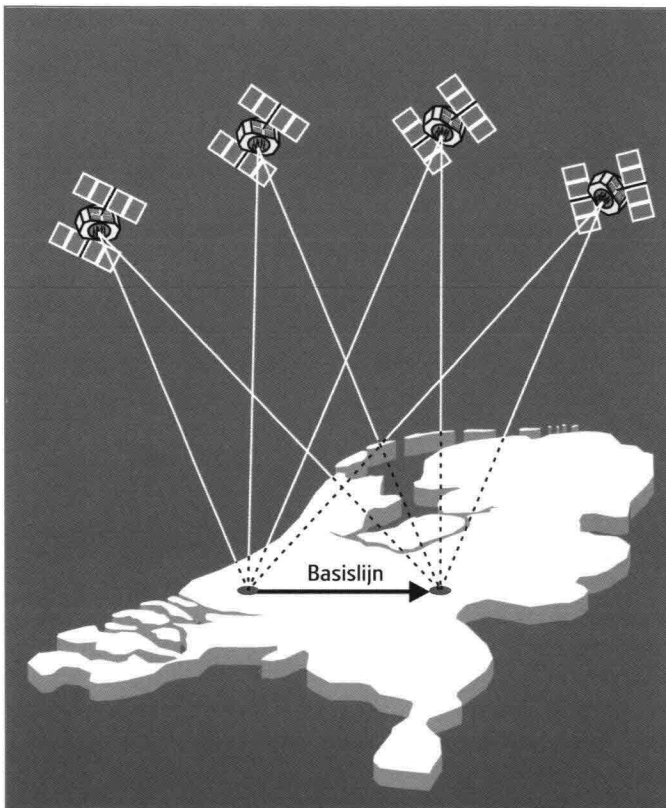
Aansluiting van de GPS-plaatsbepaling De driedimensionale coördinaatverschillen van de twee ontvangers worden in hetzelfde stelsel verkregen als waarin de coördinaten van de GPS-satellieten zijn gegeven, namelijk het World Geodetic System 84 (WGS'84). Voor de verdere toepassing echter, wensen veel gebruikers dat hun plaatsbepalingsresultaten in coördinaten van het nationale referentiestelsel worden uitgedrukt. In Nederland zijn dit het RD- en NAP-stelsel. Het RD-stelsel is een tweedimensionaal, vlak coördinatenstelsel, verkregen door projectie op een kaartvlak van een geheel Nederland bedekkende terrestrische triangulatie. De realisatie in het terrein vindt plaats via zo'n zesduizend RD-punten waarvan de x- en y-coördinaten zijn bepaald door middel van terrestrische hoek- en afstandmetingen. Het vormt daarmee het nationale referentiestelsel voor de horizontale plaatsbepaling.

Het NAP-stelsel is het nationale referentiestelsel voor de verticale plaatsbepaling. Dit door middel van waterpassingen bepaalde hoogtestelsel wordt in het terrein gerealiseerd via meer dan vijftigduizend waterpasbouten, peilschalen en ondergrondse merken. Daar het RD en NAP van origine echter twee gescheiden stelsels zijn, werd het met de intrede van het puur driedimensionale GPS noodzakelijk de terreinsrealisatie van beide stelsels uit te breiden.

Dit heeft er toe geleid dat nu van een groot aantal nieuw gerealiseerde punten zowel de RD- als de NAP-coördinaten bekend zijn, terwijl tevens op deze punten GPS-metingen kunnen worden verricht. Op deze punten is de hemelbol dan ook vrij van obstakels



Constellatie van de 24 satellieten die deel uitmaken van het wereldomvattend GPS-systeem. De satellieten bevinden zich op 20.000 kilometer van het aardoppervlak, daarom zijn ze op een groot deel van het aardoppervlak zichtbaar voor de GPS-ontvangers.

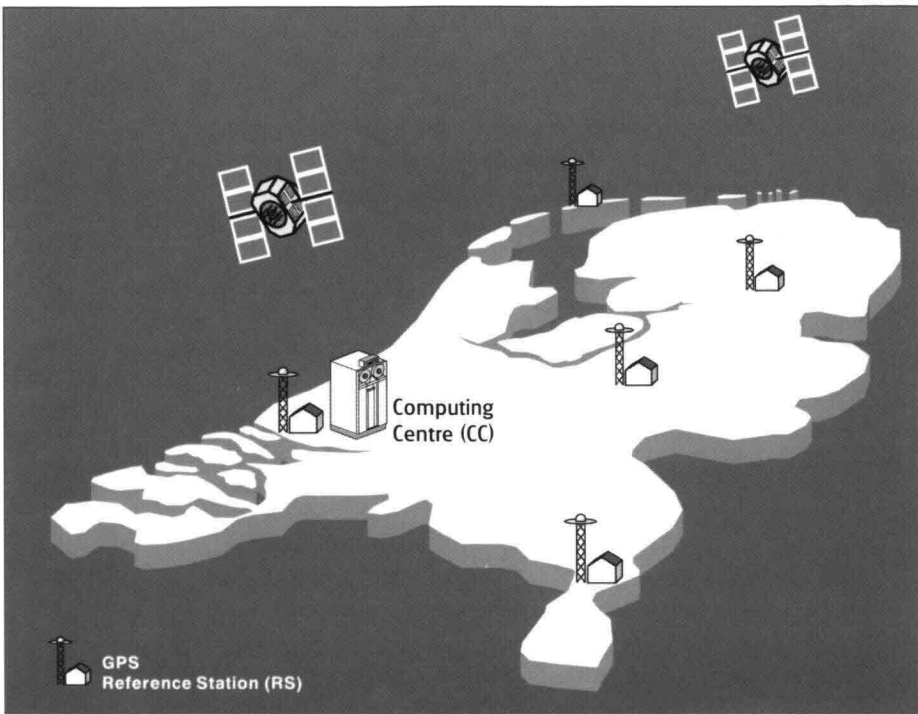


FIGUUR 2: Relatieve plaatsbepaling met twee GPS-ontvangers.

en is de kans op signaalreflecties gering. Met deze nieuw gerealiseerde punten is tevens de transformatie van het mondiale WGS'84-stelsel naar het nationale RD/NAP-stelsel mogelijk gemaakt.

HET ACTIEVE GPS REFERENTIE SYSTEEM De realisatie van het nationale referentiestelsel kan als een passief referentiesysteem worden aangeduid. Immers, hoewel de punten in driedimensionale RD/NAP-coördinaten gegeven zijn en geschikt zijn gemaakt voor het doen van GPS-metingen, zijn het toch de gebruikers zelf die voor de registratie van alle actuele GPS-gegevens met bijbehorende integriteit moeten zorgdragen. In feite verzorgt iedere gebruiker in deze opzet, vanwege het noodzakelijk gebruik van een eigen referentie-ontvanger, zelf een deel van de realisatie van de benodigde referentie. In 1991 heeft de auteur dan ook voorgesteld om ons land uit te rusten met een Actief GPS Referentie Systeem (AGRS). Het voorstel luidde [2-4] om een gelijkmatig over ons land verspreid netwerk van permanent opererende GPS-referentiestations te installeren, die elk in directe verbinding staan met een centraal rekencentrum, alwaar de verwerking, de analyse, de opslag en de verdere distributie van de data zou kunnen plaatsvinden.

De zorgvuldig uitgekozen en stabiele referentiestations zouden elk behuisd moeten worden met geavanceerde GPS-ontvangers en computerapparatuur, waarmee dan continu de aan de hemelbol 'zichtbare' satellieten konden worden gevolgd en waargenomen. Originele dan wel bewerkte data zou dan door gebruikers van het systeem kunnen



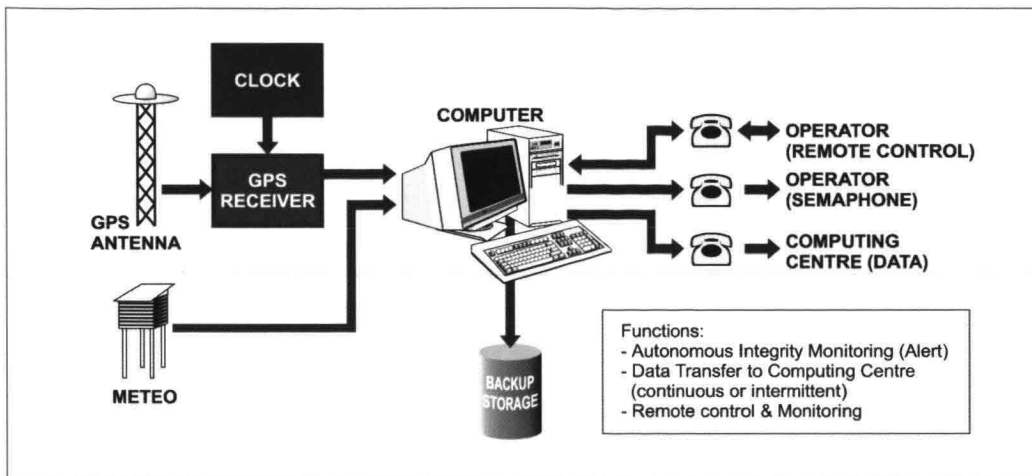
FIGUUR 3: De AGRS-referentiestations.

worden opgevraagd via een 'data retrieval systeem', daarbij onder andere gebruik makend van de mogelijkheden die de 'elektronische snelweg' biedt.

Door gebruikers over deze gegevens te laten beschikken, zou dan op ieder moment, met een eenvoudiger logistieke ondersteuning en zonder tussenkomst van zelf te installeren referentie-ontvangers, de precieze en betrouwbare plaatsbepaling van nieuw te bepalen punten kunnen worden uitgevoerd. Op deze wijze zou het te ontwikkelen AGRS dus zelf de rol van een landelijke 'digitaliseertafel' kunnen gaan spelen, waarbij dan de GPS-ontvangers van de gebruikers te velde de rol van 'digitizer' krijgen toebedeeld.

Volgend op dit voorstel heeft de Sectie Mathematische Geodesie en Puntbepaling van de TU Delft, met steun van de Koninklijke Nederlandse Academie van Wetenschappen, het initiatief genomen de technische haalbaarheid van zo'n systeem te onderzoeken. De resultaten hiervan hebben ertoe geleid dat de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat en het Kadaster zich als partners bij het onderzoek hebben aangesloten, met daarbij als essentiële inbreng de logistieke, financiële en praktische ondersteuning [5]. Inmiddels is de eerste fase in de ontwikkeling van het AGRS afgerond. In oktober 1997 is het prototype AGRS opgeleverd, dat nu door de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat en de Rijksdriehoeksmeting van het Kadaster in onderlinge coördinatie wordt geëxploiteerd. Het prototype bestaat uit een in Delft gelokaliseerd rekencentrum en vijf referentiestations:

- in Delft bij de faculteit Geodesie van de technische universiteit
- in Kootwijk bij het voormalig satellietlaser-observatorium
- in Westerbork bij het observatorium voor radio-astronomie van SRON (Stichting Ruimte Onderzoek Nederland)
- in Eijsden en
- op Terschelling.



FIGUUR 4: De componenten van een AGRS-referentiestation.

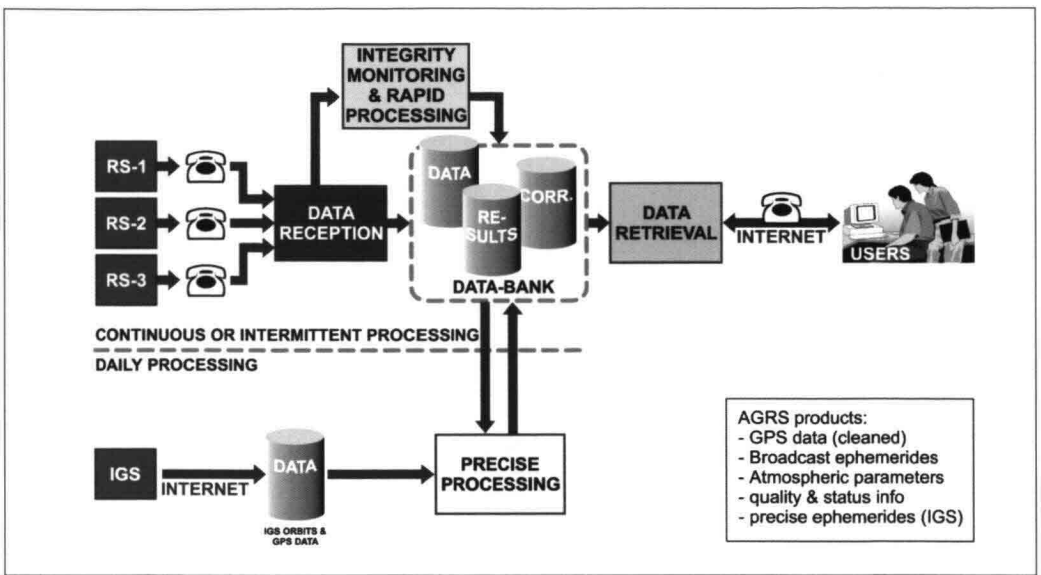
De laatste twee locaties zijn tevens peilschaalstations van Rijkswaterstaat (zie figuur 3).

De vanuit het rekencentrum op afstand aanstuurbare referentiestationen zijn onder andere uitgerust met 12-kanaals dubbele frequentie TurboRogue ontvangers, meteo-apparaatuur en een nauwkeurige kwartsklok (zie figuur 4). Voor ontvangst van de signalen worden speciale GPS-antennes met choke-ring gebruikt, die op goed gefundeerde antennemasten met voldoende stijfheid zijn gemonteerd. De computers van de referentiestationen verzorgen het inlezen, opslaan en verzenden van de GPS- en meteo-data. Per referentiestation vindt tevens al een *real-time* kwaliteitscontrole van de data plaats. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de aan de TU Delft ontwikkelde DIA-procedure voor de detectie, identificatie en adaptatie van optredende fouten.

Nadat de gegevens van alle referentiestationen zijn verzameld, vindt in het rekencentrum de centrale gegevensverwerking van het gehele netwerk plaats. Deze netwerkverwerking omvat onder andere de kwaliteitscontrole van de netwerkdata, de stabiliteittoetsing van referentiestationen, de tot een sluitend geheel vereffenen van redundante data, het voor landmeetkundige gebruikers geschikt maken van deze data en het bepalen van atmosferische parameters.

De netwerkverwerking vindt plaats via twee cycli, de zogenaamde **rapid processing cycle** en de **daily processing cycle**. De eerste cyclus is gericht op de praktische gebruiker, terwijl de tweede meer gericht is op de wetenschappelijke gebruiker van het systeem (zie figuur 5).

DE AGRS-TOEPASSINGEN Met het AGRS wordt als nulde-orde infrastructuur zowel beoogd de integriteit van het nationale referentiestelsel te garanderen, als Rijkswaterstaat en overige gebruikersgroepen in staat te stellen efficiënt en met hoge kwaliteit eigen GPS-campagnes uit te voeren. Als infrastructurele ondersteuning richt het AGRS zich dus qua toepassing op een uitgebreide gebruikersmarkt, van *real-time* navigatie en positiebepaling via een breed landmeetkundig en civieltechnisch toepassingsgebied tot hoge precisie plaatsbepaling voor geodetisch onderzoek. Van de vele toepassingen worden er drie hieronder kort belicht.



FIGUUR 5: De componenten van het AGRS-rekencentrum.

AGRS EN HOOGTEMETINGEN: DE VIJFDE NAUWKEURIGHEIDSWATERPASSING

Instandhouding van het peilmerknet van het NAP is één van de kerntaken van de Meetkundige Dienst (MD) van Rijkswaterstaat. Een directe aanleiding voor het gebruik van het AGRS is de inmiddels ten behoeve van het NAP door de MD gestarte 5de nauwkeurigheidswaterpassing [6]. Deze nauwkeurigheidswaterpassing heeft als doel de kwaliteit van het huidige primaire peilmerknet, de ruggesgraat van het NAP, te controleren. Het grote belang hiervan moge duidelijk zijn als men denkt aan de vele essentiële toepassingen die het NAP voor ons land kent, zoals onder andere het gebruik ervan voor de waterhuishouding (peilhandhaving in polders door Waterschappen), het gebruik bij de aanleg van grote infrastructurele werken (rijkswegen, kunstwerken) en het gebruik ervan als referentievlak voor waterstandsmetingen ('Nederland beschermen tegen overstromingen' is één van de kerntaken van Rijkswaterstaat).

Bij de 5de nauwkeurigheidswaterpassing, die naar verwachting in 1998 zal zijn voltooid, worden voor de eerste keer in de Nederlandse geschiedenis de conventionele optische-, hydrostatische- en ijswaterpassingen gecombineerd met GPS-hoogtemetingen. De belangrijkste redenen hiervoor zijn dat met GPS efficiënter hoogtemetingen kunnen worden uitgevoerd, waardoor in de toekomst ook met een hogere frequentie kan worden gemeten, en het feit dat met GPS de hoogteverschillen over langere afstanden preciezer kunnen worden gemeten dan met de conventionele methoden het geval is. Dit laatste is zowel van belang voor de sterkte van het net als geheel, als voor de aansluiting van het NAP-peilmerknet aan de netwerken van de ons omringende landen.

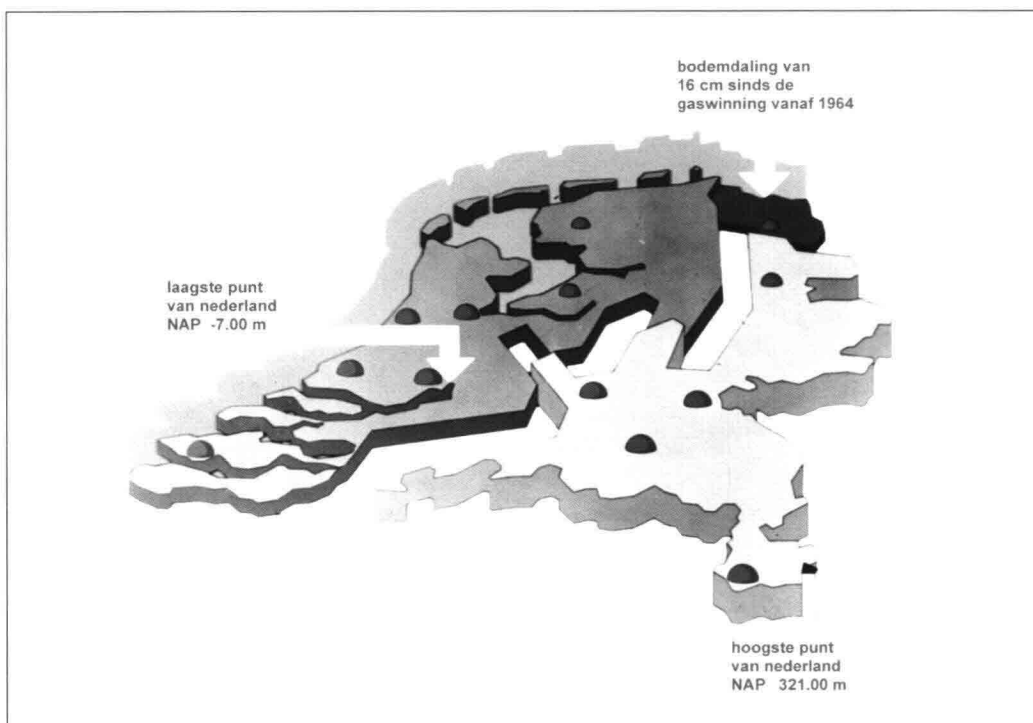
Gecombineerd met de voorgaande vier primaire waterpassingen, waarvan de eerste in de periode 1875-1885 is uitgevoerd, zal met de 'vijfde' ook een beter inzicht verkregen worden in de beweging van de 'vaste bodem' onder Nederland. Analyses van voorgaande waterpassingen hebben aangetoond dat de ondergrondse merken van het netwerk significant ten opzichte van elkaar bewegen, het zuidoosten van ons land stijgt daarbij ten opzichte van het noordwesten (zie figuur 6). De resultaten van de 5de nauwkeurigheidswaterpassing zullen dus niet alleen de actuele hoogteligging van ons land vastleggen, maar tevens een nauwkeurig en gevarieerd beeld kunnen gaan geven

van de Nederlandse bodembeweging. Dit laatste is van groot belang om het NAP als hoogwaardig referentievlak te kunnen handhaven voor het gebruik bij de zeer nauwkeurige waterstandsmetingen.

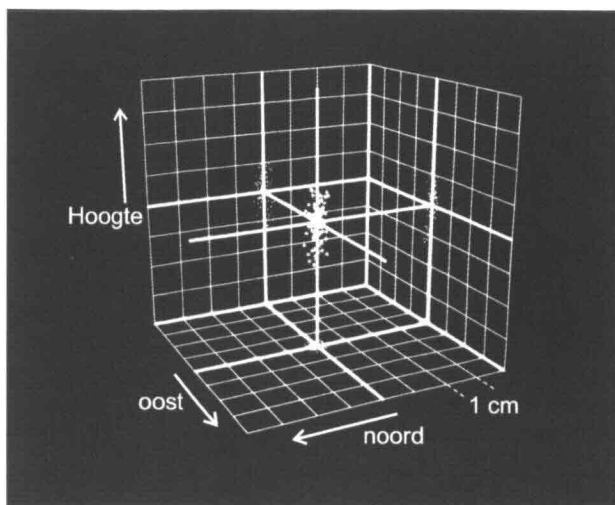
AGRS EN LANDMEETKUNDE: SNELLE PLAATSBEPALING Behalve dat GPS specifiek wordt gebruikt voor de verticale plaatsbepaling, wordt GPS door Rijkswaterstaat ook op grote schaal voor meer algemeen landmeetkundige doeleinden toegepast. Zoals eerder aangegeven, is het gebruik van fasemetingen met meer dan één ontvanger een noodzakelijke voorwaarde voor nauwkeurige plaatsbepaling. Het is echter voor veel toepassingen, om redenen van kostenbesparing, tevens van belang dat de plaatsbepaling in een zo kort mogelijk tijdsbestek kan worden uitgevoerd. Om dit te realiseren, dienen weer speciale maatregelen getroffen te worden.

GPS-ontvangers zijn niet in staat volledige faseverschillen te meten. Zij kunnen slechts fractionele faseverschillen waarnemen. Dit betekent dan ook dat de fasemeting nog is behept met een onbekende fasemeerduidigheid. De fractionele fase geeft immers geen uitsluitsel over het aantal gehele golflengten dat in de afstand van satelliet naar ontvanger past. Het is alsof men met een meetlat een afstand in millimeters meet zonder het gehele aantal centimeters te kennen.

Deze onbekende fasemeerduidigheden kunnen in principe met een voldoende nauwkeurigheid worden bepaald wanneer men een voldoende aantal satellieten over een voldoende lange periode waarneemt. De oorzaak hiervan is gelegen in de grote baanhoogte van de satellieten. Daardoor verandert de relatieve satellieten-ontvanger geometrie slechts langzaam in de tijd, zodat bij te korte waarnemingsperiodes de op te lossen stelsels vergelijkingen slecht geconditioneerd zijn, met als gevolg dat de ontvan-



FIGUUR 6: Het kantelen van Nederland om de zuidwest-noordoost-as.



Figuur 7: Driedimensionale weergave van herhaalde positiebepalingen (noord, oost, en hoogte), verkregen uit GPS-metingen. De beperkte spreiding van de punten geeft de hoge kwaliteit van het GPS als plaatsbepalingssysteem aan.

gercoördinaten en de fasemeerduidigheden niet voldoende nauwkeurig bepaald kunnen worden.

Verlenging van de waarnemingsperiode, zoals dat dan ook in het verleden werd toegepast, is hiertegen een voor de hand liggende remedie. Hiervoor heeft men echter niet de tijd als snelle plaatsbepaling is gewenst. De slechte geconditioneerdheid van het stelsel vergelijkingen kan echter sterk verbeterd worden als het geheeltallige karakter van de fasemeerduidigheden erin wordt verdisconteerd. Het ontbreken van strenge, efficiënte en dus ook snelle zoekmethoden voor het vinden van de juiste geheeltallige fasemeerduidigheden, heeft in het verleden echter een praktische toepassing van deze aanpak een geruime tijd in de weg gestaan.

Gelukkig is daar inmiddels verandering in gekomen en kunnen, onder andere door de aan de TU Delft ontwikkelde Lambda-methode [7], de onbekende fasemeerduidigheden nu wél snel worden bepaald.

Met het bepalen van de geheeltallige fasemeerduidigheden is nu nauwkeurige en directe plaatsbepaling mogelijk tot afstanden van zo'n 15 kilometer (zie figuur 7). Het is één van de huidige uitdagingen om deze maximale afstand te kunnen vergroten. En ook hier zal weer een beroep op het AGRS worden gedaan.

De reden waarom de geheeltallige waarden van de fasemeerduidigheden nog niet voldoende goed zijn te bepalen voor de zeer lange basislijnen, is gelegen in de atmosferische verstoringen. Voor lange basislijnen vertroebelen deze verstoringen het schattingsproces van de geheeltallige fasemeerduidigheden zodanig, dat met zeer korte waarnemingsperiodes nog onvoldoende betrouwbare resultaten verkregen kunnen worden.

Het is daarom nodig de gebruikers te velde te voorzien van informatie die hen in staat stelt hun data voor deze verstoringen te corrigeren. De aanpak die dan ook wordt voorgestaan, is om het permanent opererende AGRS te gebruiken als instrument voor het aanleveren van gebiedsbedekkende correcties voor deze verstoringen.

Tot slot een geheel andere toepassing van het AGRS. Zoals bekend is de waterdamp één van de belangrijkste samenstellende delen van onze atmosfeer. Nauwkeurige, dichte en frequente bemonstering van de waterdamp is daarom van belang voor klimatologisch onderzoek en voor de operationele weersvoorspelling. De traditionele wijze van waterdampmeting is gebaseerd op het gebruik van radiosondes en waterdampradiometers.

Deze technieken zijn echter nogal kostbaar en kennen daarnaast zo hun beperkingen. Hoewel met radiosondes een nauwkeurig profiel van de waterdamp is te bepalen, is de ruimtelijke en temporele resolutie laag. En terrestrische radiometers zijn slecht te gebruiken als het regent, terwijl zij, wanneer in de ruimte geplaatst, weer slecht te gebruiken zijn in de aanwezigheid van een wolkendek. Met de proliferatie van het all-weather GPS hebben meteorologen zich dan ook in toenemende mate geïnteresseerd getoond in de mogelijkheden die het systeem biedt voor waterdampsbepalingen.

Het principe van de GPS-waterdampmetingen luidt in het kort als volgt. Zoals eerder aangegeven, ondergaan de door de GPS-satellieten uitgezonden signalen een vertraging bij het doorlopen van de atmosfeer. Deze vertraging kan in drie componenten worden uitgesplitst. De eerste component wordt veroorzaakt door het geïoniseerde deel van de atmosfeer, de ionosfeer, die een ondergrens kent van 50 tot 200 kilometer en een bovengrens van 1000 tot 2000 kilometer. Daar de ionosfeer een dispersief medium is voor radiogolven, kan de ionosferische vertraging worden bepaald als de signalen, zoals dat met GPS het geval is, op twee verschillende frequenties worden uitgezonden. De ionosferische vertraging is bij benadering omgekeerd evenredig met het kwadraat van de signaalfrequentie.

Na eliminatie van de ionosferische vertraging blijven de twee overige vertragingcomponenten over. Deze worden veroorzaakt door de neutrale atmosfeer, vaak ook aangeduid als troposfeer. De dikte van de troposfeer is minder dan 9 kilometer boven de polen en meer dan 16 kilometer boven de equator. De troposferische vertraging hangt af van de refractie-index langs het looppad van het signaal en is daarmee dus afhankelijk van de droge en vochtige lucht langs dit looppad. De twee overblijvende componenten zijn dan ook de hydrostatische of 'droge' component en de 'natte' component.

Deze twee componenten zijn weer te scheiden doordat met behulp van temperatuur- en drukmetingen de 'droge' component nauwkeurig is te bepalen. Met de overblijvende 'natte' component kan dan ten slotte, na afbeelding op de lokale verticaal, de geïntegreerde waterdamp worden bepaald. Om tot een nauwkeurige waterdampsbepaling te komen, is het van belang dat van de meest precieze GPS-waarnemingen, de fasemetingen, gebruik kan worden gemaakt en dat de overige parameters in het model, zoals de positie-coördinaten van de ontvangers en de baanparameters van de satellieten, al voldoende bekend zijn. Daar dit met het AGRS het geval is, beschouwt het KNMI dit systeem nu als de meest geschikte GPS-infrastructuur voor het doen van GPS-waterdampmetingen in Nederland [8]. Daarmee is een verrassende toepassing van het AGRS gevonden, een die de auteur in zijn oorspronkelijke voorstel nog niet voor mogelijk had gehouden.

WOORD VAN DANK Niet zelden zitten bij complexe projecten vele jaren tussen de 'ideevorming' en 'realisatie'. Dat geldt ook voor het AGRS. Dat deze periode echter nog overzichtelijk is gebleven is zeker te danken aan de vele collega's, bestuurders en onderzoekers, die op enthousiaste wijze hebben meegewerkt aan de nieuwe ontwikkeling. De dank van de auteur gaat met name uit naar ir. R. Olierook en ir. E.J. Riedstra, voormalig en huidig Hoofd Ingenieur Directeur van de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat en mr. J. Besemer, voorzitter van de Raad van Bestuur van het Kadaster. Beiden hebben het belang van het AGRS onderkend en de ontwikkeling ervan, samen met hun medewerkers, sterk ondersteund. Van de enthousiaste onderzoeksgroep moeten in het bijzonder worden genoemd dr.ir. H. van der Marel, de 'bouwer' zonder wie het huidige systeem nooit was gerealiseerd, en dr.ir. C. de Jong, die de monitoring en kwaliteitscontrole van de referentiestations verzorgde.

Een korte geschiedenis van het RD en NAP

De eerste triangulatie van Nederland heeft in het begin van de 19de eeuw (1802-1811) plaatsgevonden. Dit gebeurde onder leiding van generaal Krayenhoff en had als doel de vervaardiging van de eerste topografische kaart. Vanaf 1885 werd een hernieuwde triangulatie uitgevoerd, onder leiding van professor Schols. Dit was ten behoeve van de kadastrale hermetingen en tevens om te kunnen voldoen aan de eisen van de Europese Graadmeting. De lengten en breedten van het 77 punten tellende eerste-orde net van deze triangulatie zijn via een vereffening op de ellipsoïde van Bessel berekend. Hieruit zijn de twee dimensionale RD coördinaten afgeleid in het vlak van de stereografische kaartprojectie, met als centraal punt de stang van de Lieve-Vrouwetoren in Amersfoort.

In opeenvolgende perioden is het eerste-orde net verder verdicht tot het niveau van de zogenaamde vierde-orde punten. Bij benadering zijn de onderlinge afstanden van eerste- tot vierde-orde punten respectievelijk, 30 km, 10 km, 4 km en 2 km. Met het operationeel worden van GPS is het RD-netwerk uitgebreid met punten die speciaal geschikt zijn voor het gebruik van GPS.

Deze punten hebben een onderlinge afstand van 10 à 15 km en zijn lokaal verbonden met de omliggende terrestrisch bepaalde RD-punten.

De eerste nauwkeurigheidswaterpassing van Nederland heeft in de periode 1875-1885 plaatsgevonden. Dit gebeurde onder leiding van professor Cohen Stuart en heeft in 1891 geleid tot de invoering van het Normaal Amsterdams Peil, dit ter onderscheiding van het 'Amsterdamsch Peyl' wat omstreeks 1700 was bepaald als het niveau van de gemiddelde vloed op het Amsterdams IJ. Het referentievlak van het NAP wordt door een bout in een speciale funderingspaal onder het plaveisel op de Dam in Amsterdam gematerialiseerd.

De tweede nauwkeurigheidswaterpassing had plaats in de periode 1926-1940 en stond onder leiding van professor Schermerhorn. De hernieuwde waterpassing was noodzakelijk geworden vanwege zakking en het verloren gaan van peilmerken. Als remedie hiertegen is bij de tweede nauwkeurigheidswaterpassing dan ook besloten tot het plaatsen van granieten zuilen op stabiele ondergrond, de zogenaamde ondergrondse merken. Ter controle van deze peilmerken zijn later nog de derde (1950-1959) en de vierde (1965-1978) nauwkeurigheidswaterpassing uitgevoerd.

Inmiddels is men toegekomen aan de vijfde nauwkeurigheidswaterpassing, waarbij nu voor het eerst ook het GPS wordt ingeschakeld.

NOTEN

- 1 A. Kleusberg, P.J.G. Teunissen (1996): GPS for Geodesy, Earth Science Series, Springer Verlag, Vol. 60.
- 2 P.J.G. Teunissen (1991): De geodetische lijn. De Ingenieur, Orgaan van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs, Vol. 103, No. 6/7, pp. 24-30.
- 3 P.J.G. Teunissen (1991): Kwaliteitszorg in geodetisch perspectief. NGT Geodesia, No. 12, 1991, pp. 526-530.
- 4 C. de Jong e.a. (1994): Een actief GPS-referentiesysteem in Nederland. Nederlandse Commissie voor Geodesie, GPS-nieuwsbrief, No. 9/1, 1994, pp. 1-18.
- 5 M. Hofman e.a. (1995): Actief GPS-referentiesysteem voor Nederland. NGT Geodesia, No. 5, 1995, pp. 227-230.
- 6 M.E.E. Haagmans e.a. (1996): Actief GPS-referentiesysteem voor Nederland - een tussentijdse stand van zaken. NGT Geodesia, No. 12, 1996, pp. 517-521.
- 7 P.J.G. Teunissen e.a. (1995): A new way to fix carrier-phase ambiguities. GPS-World, Vol. 6, No. 4, pp. 58-61.
- 8 H. Derks e.a. (1997): GPS water vapour meteorology. Scientific report WR 97-04, KNMI, De Bilt.

RADARHOOGTEMETINGEN EN
DE **VOORNAME**
ROL VAN **DELFT**

Een satelliet ziet meer in de waterspiegel
dan alleen zichzelf

M. Naeije
15

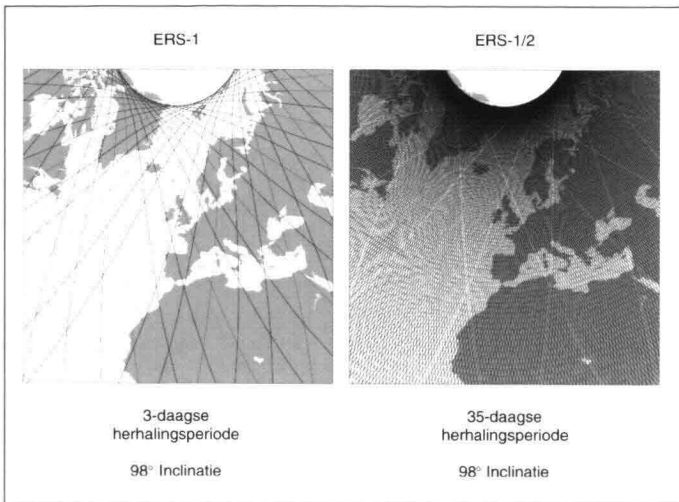
• • •

Het Instituut voor Aardgericht Ruimteonderzoek (DEOS in het Engels) van de TU Delft is een van de weinige instituten in Nederland waar radarhoogtemetingen worden verwerkt en geanalyseerd. Deze metingen zijn afkomstig van de aardobservatiesatellieten die het leefmilieu in kaart brengen. Zij worden vooral gebruikt om de hoogte van de waterspiegel te bepalen. Zoveel ervaring heeft DEOS al opgedaan met de metingen, dat het internationaal een voor-aanstaande positie heeft verworven en nauw wordt betrokken bij de missies van radarhoogtemeter-satellieten. Waarom waterstandsmetingen nodig zijn en hoogtemetingen zo nuttig.

• • •

Aardobservatie-satellieten, ook wel remote-sensing-satellieten genoemd, zijn ideale platforms om de aarde vanaf afstand in de gaten te houden. Ze zijn in staat om vanuit een baan om de aarde de gehele wereldbol in een relatief korte tijd te 'bekijken', en deze waarnemingen regelmatig te herhalen. Een voorbeeld van een meetinstrument dat op zo'n platform wordt ingezet om het zeeniveau te bepalen, is de zogenaamde radar hoogtemeter. Door het uitzenden en terugontvangen van een aan het water gereflecteerde radarpuls, kan dit instrument de afstand tussen de satelliet en zeeoppervlak recht onder de satelliet bepalen.

Als nu de exacte hoogte van de satelliet ten opzichte van het massamiddelpunt van de aarde of één of ander referentieniveau bekend is, valt heel gemakkelijk het zeeniveau ten opzichte van dat referentieniveau af te leiden door de meting van de hoogte van de satelliet af te trekken. Bij het Instituut voor Aardgericht Ruimteonderzoek van de TU Delft (DEOS, Delft Institute for Earth-Oriented Space Research) wordt de positie van de satelliet zeer nauwkeurig uitgerekend met behulp van ruimtegeodetische technieken, en vinden de eerste analyses van de metingen plaats. Rijkswaterstaat is een dankbaar gebruiker van de berekende waterstanden. Maar waarom is kennis over het zeeniveau, oftewel de hoogte van de waterspiegel, zo belangrijk?



FIGUUR 1: Ruimtelijke resolutie of bedekking van typische radarhoogtemeter-satellieten.

WAAROM WATERSTANDSMETINGEN? Er zijn legio toepassingen voor waterstandsmetingen te bedenken, maar laten we wat uitzoemen en het grote kader beschouwen waarbij iedereen belang heeft, namelijk het klimaat. Het klimaat wordt voor een belangrijk deel bepaald door de oceanen en de poolkappen. Logisch, want dit bestrijkt het merendeel van de aarde. Het oceaanwater neemt de helft van het totale warmtetransport van de evenaar naar de polen voor zijn rekening, en zorgt zo voor een gematigd klimaat op hogere breedtegraden. De oceanen absorberen ook een deel van de broeikasgassen in de atmosfeer. Verder wordt het klimaat direct en indirect beïnvloed door veranderingen in de diepzeecirculatie, de windgedreven oppervlactecirculatie en verschijnselen zoals El Niño. Via het poolijs, dat zo'n 80% van de zoetwater voorraad bevat, wordt de hydrologische cyclus geregeld en daarmee ook het zeeniveau bepaald. Voor het kijken naar klimaatveranderingen, ze proberen te begrijpen, voorspellen of misschien wel manipuleren is dus een continue observatie - 'monitoring' - van de oceanen en poolkappen onontbeerlijk. Hiervoor zijn metingen nodig van het hele systeem (globaal), die worden herhaald binnen de tijd dat belangrijke veranderingen plaatsvinden (semi-synoptisch). Die metingen kunnen dan fungeren als randwaarden voor de gekoppelde oceaan-atmosfeermodellen en zo uiteindelijk leiden tot voorspellingen van zowel de atmosfeer als de oceaantoeestand. Het zal duidelijk zijn dat alleen satellieten kunnen voldoen aan condities als globaal en semi-synoptisch. Hierbij moet wel een compromis worden gesloten tussen ruimtelijke en temporele resolutie oftewel hoe frequent eenzelfde punt wordt bemeet en hoe dicht verschillende punten bij elkaar liggen. Een hogere bemonsteringsfrequentie gaat gepaard met een lagere ruimtelijke resolutie.

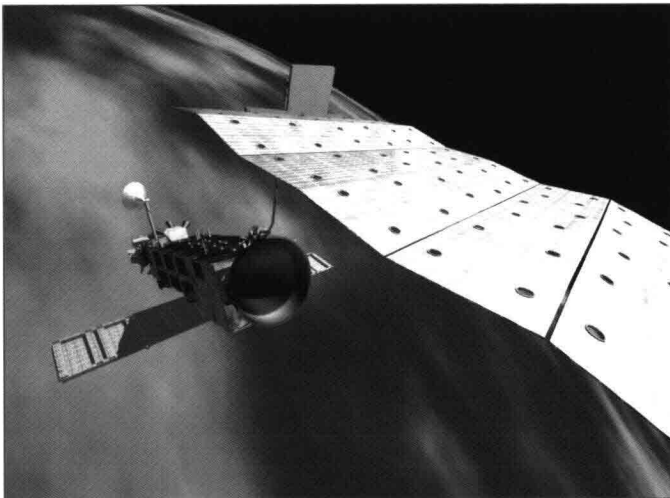
Dit is weergegeven in figuur 1 voor de ERS-satellieten die in een bijna polaire baan zitten, wat betekent dat de satelliet bijna de gehele aarde in zicht krijgt. De satelliet beweegt dan van pool tot pool en ondertussen draait de aarde daar onderdoor. Geprojecteerd op een plat vlak, krijgt men dan een verzameling sinusvormige sporen, ook wel tracks genoemd, die na elke omloop ten opzichte van elkaar verschuiven. Tezamen vormt dit een ruitjespatroon, dat na de herhalingsperiode van de baan weer wordt herhaald. In de figuur worden links dezelfde punten al na drie dagen bemeet, terwijl rechts de satelliet pas na 35 dagen weer terugkomt op het uitgangspunt. Het verschil in ruimtelijke resolutie is duidelijk. De rode tracks geven de bedekking na

een dag, die nagenoeg hetzelfde is. Vaste stations op zee of aan de kust hebben een uitstekend oplossend vermogen in de tijd, maar ruimtelijk blijven ze ver achter. Het ligt dan ook voor de hand de radarhoogtemetingen te combineren met peilschaalmetingen van getijdestations. Dat de zeehoogte of waterstand een belangrijke parameter is in het complexe systeem 'aarde', is al jaren bekend en was de drijfveer achter de ontwikkeling van zogenaamde satelliet radar hoogtemeter-missies, die al begon in 1973 met een experiment aan boord van Skylab, en inmiddels is uitgegroeid tot een volwaardig monitoringstelsel met speciaal toegeruste satellieten van onder anderen ESA, NASA, en CNES, de drie belangrijkste ruimteagentschappen.

Waterstand is een direct gevolg van lokale zwaartekracht - een min of meer vaste of permanente component - plus de som van stromingen, getijden, wind en atmosferische storingen, de variabele component. Het eerste noemen we geoid, het tweede dynamische topografie. De geoid is een equipotentiaal vlak dat per definitie loodrecht staat op de lokale effectieve zwaartekracht, die wordt veroorzaakt door het zwaartekrachtveld van de aarde, en door het feit dat de aarde roteert. Zonder stromingen en andere dynamische verschijnselen zoals getijden en golven, zou dus het zeeniveau de geoid definiëren. Dit is natuurlijk niet het geval, en is het juist interessant om de afwijkingen ten opzichte van de geoid te bestuderen. Veranderingen op lange termijn kunnen samenhangen met veranderingen in het klimaat. Observeren van de zeespiegel is dus belangrijk voor het voorspellen van trends, wat op zijn beurt weer vitale informatie oplevert voor kustbeheer, en zo zijn we weer terug bij de meer praktische toepassingen van waterstandsmetingen.

Belangrijk voor Nederland is het in de gaten houden van getijdestromingen en windopzet in de Noordzee en het hieruit voorspellen van stormvloed. Een toepassing, waarin Rijkswaterstaat niet alleen is geïnteresseerd, maar ook al gebruikt.

Maar er is meer. De stromingen in de oceaan transporteren niet alleen water, maar ook sediment, afval en warmte. Van een globale dataset met zeehoogten, zowel gemiddeld over een lange periode als de variaties daarop, wordt veelvuldig gebruik gemaakt in de oceanografie, de geofysica, het klimaatonderzoek, milieuvraagstukken, scheepsrouting, visserij, en militaire en civiele activiteiten op zee en aan de kust.



FIGUUR 2: Impressie van ENVISAT-1, de toekomstige Europese aardobservatie-satelliet (Image ESA/ISD VISULAB).

De vaste component, ook wel aangeduid met gemiddeld zeeoppervlak, geeft een beeld van massaconcentraties op of onder de oceaanbodem en wordt gebruikt voor bodemkartering en olie- en gasexploratie. Bovendien wordt de hoogtemeter ook als oppervlakte-ruwheidsmeter gebruikt. Zo kunnen de golfhoogte en de windsnelheid aan het zeeoppervlak worden bepaald uit de vorm van de terugontvangen puls aan boord van de satelliet. Dit wordt gebruikt voor het bepalen van karakteristieken van het golfklimaat in gebieden waar gevaren of geboord wordt of waar pijpen moeten worden gelegd.

GESCHIEDENIS Voordat hier dieper wordt ingegaan op het meetproces, eerst een stukje geschiedenis. Waterstandsmeting vanuit de ruimte begon als een experiment aan boord van het ruimtestation Skylab aan het begin van de jaren zeventig. De eerste bevindingen waren dusdanig dat de radarhoogtemeter al snel een eigen plek kreeg op de satellietbus. De eerste was op GEOS-3, die opereerde van 1975 tot 1978. De ruis in de metingen was toen zo'n 50 cm, zodat men net in staat was om de golfstroom waar te nemen (een hoogtevariatie van ongeveer 2 meter over een afstand van 100 kilometer). Beter zicht kreeg men later in 1978 met de hoogtemeter aan boord van SEASAT, waarbij de ruis tot 10 cm was teruggebracht. Helaas was deze satelliet geen lang leven beschoren, omdat al na drie maanden problemen optraden met de energievoorziening. Toch hebben beide satellietmissies laten zien welke mogelijkheden er zowel op geodetisch als op oceanografisch gebied zijn. Echter met GEOSAT, er is dan sprake van de tweede helft van de jaren tachtig, heeft het onderzoek naar het zeeniveau vanuit de ruimte een hoge vlucht genomen.

De ruis was verder teruggebracht tot 5 cm en wetenschappers, overheden en bedrijven konden voor het eerst in de geschiedenis beschikken over een globale dataset van waterstanden met een relatief hoog temporeel en spatieel oplossend vermogen, en dat voor een aaneengesloten periode van drie jaar. Helaas vielen in 1990 de taperecorders uit, zodat aan boord geen data meer kon worden opgeslagen, en GEOSAT dood werd verklaard. GEOSAT had een nieuw tijdperk ingeluid voor de aardobservatie; de overgang van zuiver experimenteel naar een (semi) operationeel monitoringsysteem. Hierna volgden in een rap tempo de eerste Europese Remote Sensing Satellite ERS-1 van ESA in 1991, de Amerikaans-Franse oceaansatelliet TOPEX/POSEIDON van NASA/CNES in 1992, ERS-2, opvolger van ERS-1, in 1995, en onlangs werd GFO gelanceerd, de opvolger van GEOSAT. De hoogtemeters aan boord van deze satellieten hebben een relatieve nauwkeurigheid (lees: ruis) van zo'n 3 cm, en dat op een afstand van zo'n 1000 km! Dit moet echter niet worden verward met de absolute nauwkeurigheid, die voor een belangrijk deel wordt bepaald door de nauwkeurigheid van de baanberekening. Dit komt later nog ter sprake. Om ook voor de toekomst verzekerd te zijn van een continue stroom van metingen staan nieuwe missies op stapel. De belangrijkste zijn ENVISAT-1, de start van een nieuwe generatie ERS-satellieten, en JASON-1, de opvolger van TOPEX/POSEIDON. De verwachting is dat beide satellieten medio 2000 worden gelanceerd. Figuur 2 geeft een impressie van ENVISAT, een kolossaal gevaarte van ongeveer 2 bij 2 bij 12 meter en een gewicht van 2000 kg. Deze satelliet is speciaal toegerust om het milieu en klimaat van de aarde te bestuderen. Het pakket aan meetinstrumenten bestrijkt zowel het land, de zee, het ijs en de atmosfeer, en omvat tien verschillende instrumenten, waaronder de hoogtemeter, een ozonmeter en een temperatuurmeter.

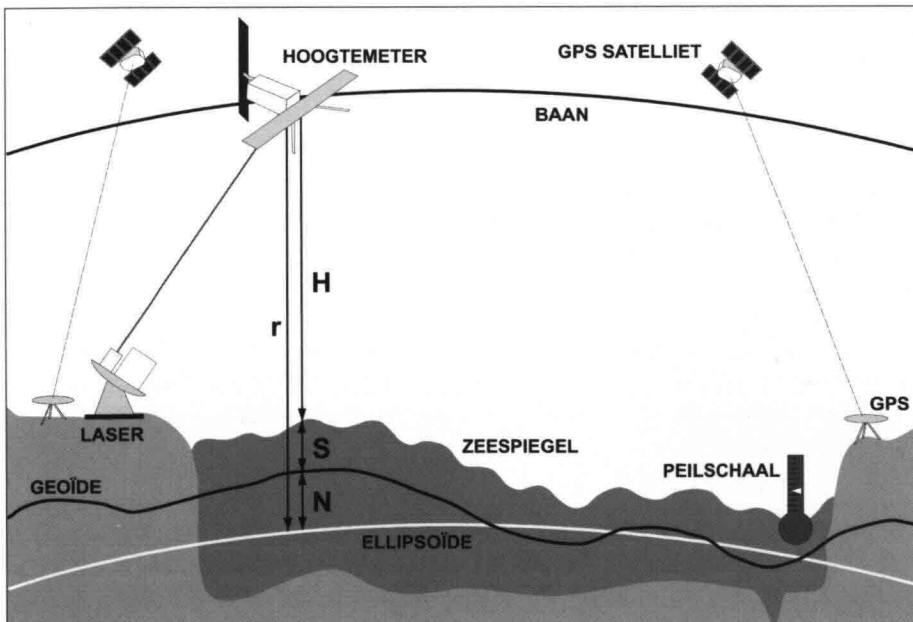
VAN AFSTANDSMETING TOT WATERPEIL Figuur 3 geeft schematisch weer hoe vanuit de ruimte de zeehoogte bepaald kan worden met behulp van een radarhoogtemeter. De radar aan boord van de satelliet zendt een radarpuls (microgolf) uit naar de

aarde loodrecht onder hem. Aan het oceaanoppervlak, wat zo'n 70% van het totale aardoppervlak uitmaakt, wordt de puls gereflecteerd en teruggezonden richting satelliet. Vervolgens wordt de puls weer terugontvangen aan boord van de satelliet, en wordt de tijd gemeten die de puls nodig heeft om heen en weer te reizen tussen oceaanoppervlak en satelliet. Dit is een maat voor de afstand, mits de snelheid waarmee de radargolf zich voortplant nauwkeurig bekend is.

Fouten in de bepaling van de afstand kunnen optreden door veranderingen in de snelheid waarmee de radargolf zich voortplant door de atmosfeer. Zo zullen vrije elektronen, luchtmoleculen en waterdamp de puls vertragen. Gaat men uit van de voortplantingssnelheid in vacuüm, de lichtsnelheid, dan zal deze vertraging dus resulteren in een overschatting van de afstand. Blijkbaar zijn diverse correcties noodzakelijk om het uiteindelijke doel, het meten van het waterpeil, te bereiken.

In de ionosfeer, die zich uitstrekt van zo'n 50 tot 1000 km hoogte, hangt het effect af van het aantal vrije elektronen en de frequentie van de uitgezonden radargolf. Dit kan direct worden bepaald met behulp van een multi-frequentie-hoogtemeter, door metingen op verschillende frequenties met elkaar te vergelijken. Het effect kan oplopen tot zo'n 20 cm, maar kan tot op ongeveer 5 mm nauwkeurig worden bepaald. In de troposfeer, die bij de grond begint en loopt tot zo'n 15 km, hangt de benodigde correctie af van de hoeveelheid luchtmoleculen (droge component) en waterdamp (natte component).

De droge component volgt uit een model van de verticale verdeling van de gassen in de atmosfeer, en is afhankelijk van de luchtdruk aan het zeeoppervlak en de breedtegraad van het punt recht onder de satelliet. De grootte bedraagt ongeveer 2.3 m. Dit is echter te bepalen met een nauwkeurigheid van beter dan 2 cm. De natte component is afhankelijk van de waterdampdruk en de temperatuur aan het zeeoppervlak, en vertoont een veel grilliger verloop. Voor deze correctie zijn we afhankelijk van veronderstellingen over de verticale verdeling van waterdamp, aangevuld met meteorologische metingen. Tegenwoordig ziet men vaak naast de hoogtemeter ook een microgolfradiometer aan boord van de satelliet. Dit instrument kan de totale massa van zowel de waterdamp als



FIGUUR 3: Bepaling van de zeehoogte vanuit de ruimte.

de waterdruppels (condensatie) bepalen voor een kolom van de atmosfeer recht onder de satelliet, via het meten van de straling die wordt uitgezonden door waterdamp op bepaalde frequenties. De ordegrootte van deze correctie is ongeveer 40 cm, en kan ook met een nauwkeurigheid van zo'n 2 cm worden bepaald.

Een andere fout die wordt gemaakt en dient te worden gecorrigeerd, is de zogenaamde elektromagnetische bias. Hierbij speelt de ruwheid van het zeeoppervlak (lees: golfhoogte) een grote rol. Golfdalen zijn wat vlakker en minder steil en geven een sterkere reflectie van het radarsignaal dan de golftoppen. Dit leidt wederom tot een overschatting van de afstand. Ook de interpretatie van het terugontvangen signaal zal worden bemoeilijkt door een ruwere zee. Het totale effect van zeegolven op de afstandsbepaling valt onder de noemer **sea state bias** en bedraagt ongeveer 5% van de golfhoogte die ook uit het terugontvangen signaal van de hoogtemeter kan worden gehaald. Dit kan oplopen tot zo'n 50 cm.

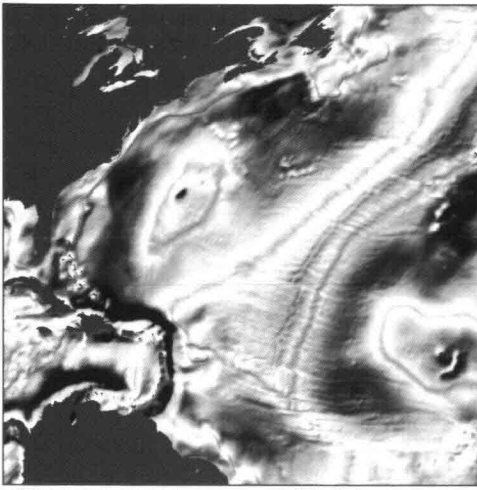
Het aardoppervlak kan mathematisch worden beschreven door een omwentelingsellips die zo goed mogelijk aansluit bij de geoïde. Deze zogenaamde referentie-ellipsoïde, die verder geen fysische betekenis heeft, wordt meestal als referentie gebruikt ten opzichte waarvan de geoïde wordt 'gemeten', en ten opzichte waarvan de positie van de satelliet wordt bepaald. Vanwege de inhomogene massaverdeling binnen de aarde en de onregelmatige vorm van het aardoppervlak wijkt de geoïde lokaal af van de referentie-ellipsoïde (orde van grootte 50 m.).

Als zich op de bodem van de oceaan een massaconcentratie bevindt, bijvoorbeeld in de vorm van een onderzees gebergte, zal de geoïde daar plaatselijk een bult vertonen, en vice versa een dal vertonen bij een trog in de oceanobodem. De dynamische topografie draagt maar zo'n 1.5 m bij aan het zeeniveau, zodat in feite het actuele zeeniveau een goede weergave oplevert van wat er zich lokaal op de oceanobodem bevindt wat betreft massaconcentraties. Radarhoogtemetingen kunnen dus gebruikt worden voor het in kaart brengen van de zogenaamde bathymetrie, oftewel oceanobodemtopografie, en het opsporen van gasbellen en olievelden.

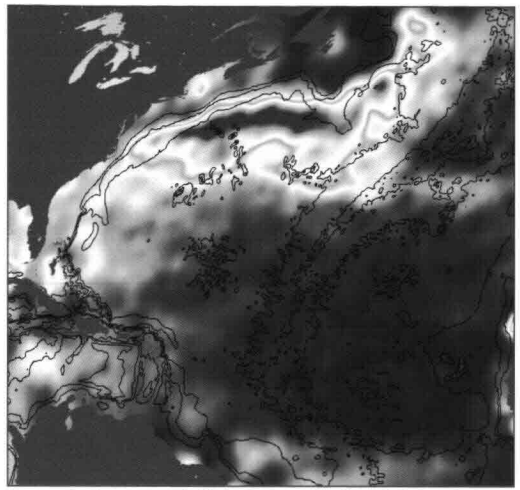
Verder worden de metingen gebruikt om huidige zwaartekracht- en geoidmodellen van de aarde te verbeteren. Inderdaad verbeteren, want de bestaande modellen zijn nog niet nauwkeurig genoeg om de hoogtemetingen foutloos te reduceren tot dynamische zeehoogten. Zowel de satelliethoogte, ofwel de baanbepaling, als de gemodelleerde geoidhoogte geven aanleiding tot fouten. Daarbij komt nog dat beide aan elkaar zijn gerelateerd. De satellietbaan is afhankelijk van de vorm van de geoïde, omdat de satelliet reageert op ruimtelijke variaties in de zwaartekracht. Gelukkig zijn alleen de groot-schalige geoidvariaties van belang voor de bepaling van de satellietbaan, en die zijn bekend tot op centimeterniveau.

Fouten in de positiebepaling van satellieten op 1000 kilometer hoogte zijn met de huidige kennis in de orde van 5 cm of beter. Tien jaar geleden was dat nog zo'n 100 cm. Echter, de kleinschalige geoidvariaties zijn nog niet bekend op centimeterniveau. Hiervoor worden op dit moment speciale ruimtemissies ontwikkeld. GOCE, een initiatief van ESA, is hiervan een goed voorbeeld. Deze missie behelst een satelliet op 250 km hoogte met uiterst gevoelige versnellingsmeters (gradiometer) aan boord.

Als de hoogtemeting is gereduceerd tot zeehoogte, kan de verwerker aan de slag. Vaak zal de geodynamicus of oceanograaf niet direct geïnteresseerd zijn in de bijdrage van getijden. Een eerste stap in het verwerkingsproces zal dan ook zijn de toepassing van getijdemodellen om hiervoor te corrigeren. In deze modellen wordt rekening gehouden met de verticale beweging van het oceaanooppervlak en de aardkorst door de aantrekkingskracht van voornamelijk zon en maan, en de verticale beweging van de aardkorst onder de druk van het bovenliggende oceaanooppervlak.



FIGUUR 4: Gemiddeld zeeoppervlak in het noorden van de Atlantische Oceaan.



FIGUUR 5: Oceaanvariabiliteit voor de Noord-Atlantische Oceaan.

De nauwkeurigheid van de globale modellen is zo'n 5 tot 10 cm ter plaatse van de grote oceanobassins. In kustwateren kan deze nauwkeurigheid echter drastisch teruglopen en zal een lokaal model moeten worden gebruikt, dat wordt gevoed met lokale getijdemetingen. De volgende stap in het verwerkingsproces is de verwijdering van de radiale baanfout, die via de baanbepaling van de satelliet in de zeehoogtemeting terecht is gekomen. Voor dit doel zijn in Delft speciale filtertechnieken ontwikkeld. Deze filters worden toegepast op verschilmetingen, hetzij langs hetzelfde spoor of track (collinear tracks analysis), of op plekken waar de sporen elkaar kruisen (crossover minimisation). Vervolgens splitst de verwerking in twee paden: de geodeet of geodynamicus zal kijken naar het gemiddelde van de metingen en probeert de ruis in de vorm van stromingen weg te werken. De oceanograaf is juist in die ruis geïnteresseerd en zal proberen de gemiddelde component weg te werken. Hij kijkt naar variaties, oftewel de standaardafwijking van het signaal. Dit is een maat voor de kinetische energie, die wordt vertegenwoordigd door de veranderlijke oceaanstromingen. Waar wervels in beweging zijn of stromingspatronen aan het zeeoppervlak veranderen in de tijd, zal de variabiliteit pieken vertonen.

EEN AANTAL TOEPASSINGEN Ter illustratie van één van de toepassingsmogelijkheden van de hoogtemeting, is in figuur 4 een model weergegeven van het gemiddeld zeeoppervlak voor de Noord-Atlantische Oceaan. Het is berekend uit radarhoogtemetingen van de ERS-2-satelliet. De hoge correlatie met de bodemtopografie komt hier duidelijk naar voren. Om de kleinschalige fluctuaties te benadrukken, zijn de grootschalige trends weggefilterd door een grof geoidemodel af te trekken. Het diepte-effect wordt verkregen door zogenaamde shading toe te passen: in een bepaalde richting wordt de gradiënt van het oppervlak bepaald, die vervolgens de intensiteit van de kleur aanstuurt. Zo wordt kunstmatig zonlicht gecreëerd, en zodoende schaduw.

Te zien is voornamelijk reliëf door massaconcentraties op en in de oceaانبodem. Bergen en bergruggen geven een hoog signaal (rood tot bruin) en troggen en kloven een laag signaal (blauw tot paars). De continentale randen en de eilanden zijn duidelijk zichtbaar, en zo ook de Puerto Ricotrog en de Middenatlantische Rug. Deze rug wordt

gesneden door een aantal fractuurzones, en vertegenwoordigt een zogenaamde actieve spreidingszone. Hier is in de afgelopen miljoenen jaren materiaal vanuit het binnenste van de aarde naar boven gestuwd en naar weerskanten weggeduwd. Dit proces, hoe traag ook, is nog steeds in volle gang. Nog interessanter wordt het als gekeken wordt naar gebieden waar geen duidelijk verband bestaat tussen zeereliëf en bodemtopografie. Hier biedt het reliëf namelijk zicht op interne geologische structuren zoals diepe scheuren in de bodem die in de loop van de tijd gevuld zijn geraakt met sediment, oftewel materiaal met een lagere dichtheid.

Figuur 5 laat, voor hetzelfde gebied en gebaseerd op dezelfde metingen, de oceaانvariabiliteit zien. De stationaire component is verwijderd en te zien is slechts de variabele component van het zeeoppervlak; de standaardafwijking van het signaal. Paars/blauw kan worden geassocieerd met rustige gebieden; daar waar het signaal niet veel afwijkt van het gemiddelde, en rood/bruin met onrustige gebieden; gebieden waar een verhoogde activiteit of afwijking aanwezig is. Hier komt dit door het regelmatig verschuiven van de Warme Golfstroom en de Noord-Atlantische Drift.

Door het Coriolis-effect, het optreden van schijnkrachten als gevolg van het draaien van de aarde, gaan stromingen meanderen of golfbewegingen (noord-zuid) maken. Deze bewegingen zijn niet altijd dezelfde en uit instabiliteiten kunnen vervolgens wervels ontstaan. Zo nu en dan wordt een top of een dal van zo'n golf afgesnoerd en gaat een eigen leven leiden. Deze vorming en vervolgens beweging van wervels dragen ook bij tot een verhoogde zeeactiviteit die door de variabiliteit wordt geregistreerd.

Ten noorden van de Warme Golfstroom vindt men meestal warme kernen, omdat hierin water is opgesloten afkomstig van de 'warme' Sargassozee, en ten zuiden koude kernen waarin koud kustwater of water uit de Labradorzee is ingesloten. Opmerkelijk genoeg gaat de activiteit netjes langs de helling van het continentale plat van de Noord-Amerikaanse oostkust. Blijkbaar heeft wat er aan het oppervlak gebeurt ook voeling met de bodem. Uiteindelijk vertakt de hoofdstroom zich in twee stromen, een energetische tak naar het noordoosten, de tak die verantwoordelijk is voor ons milde klimaat, en een wat minder energetische tak naar het zuiden, die deels recirculeert naar het westen om weer terug te gaan naar de Golfstroom, en deels naar het oosten loopt en via de Azoren uitmondt in de Canarische Stroom.

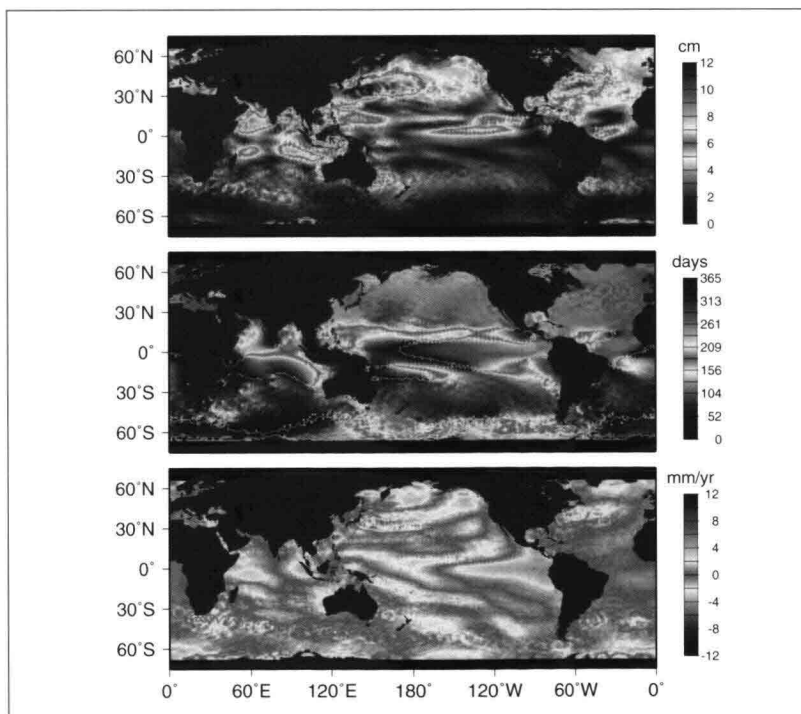
Als men slechts schepen tot zijn beschikking zou hebben, zou het tientallen jaren duren voordat voldoende data zijn gecumuleerd om deze observaties te doen. Met de satelliet lukt dat al na een paar dagen.

Voor dit gebied, en dan met name de Warme Golfstroom, produceert DEOS in samenwerking met de National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) in de Verenigde Staten semi-real-time altimeterproducten. Op dit ogenblik duurt het ongeveer 5 tot 10 uur om de metingen op te nemen, aan boord te verzamelen, naar een grondstation te sturen, om te zetten naar geofysisch te interpreteren waarden, grove correcties toe te passen, en te distribueren naar de gebruikers. Veel correcties, waaronder de baanhoogte, zijn dan nog niet voorhanden. In Delft wordt dan ook gewerkt met baanpredicties, voorspellingen. De nauwkeurigheid van deze voorspellingen bedraagt ongeveer 10 cm. Hoewel de berekende zeehoogten iets minder nauwkeurig zijn, zijn ze binnen een dag beschikbaar. Zo kunnen ze dus belangrijk zijn voor operationeel gebruik, bijvoorbeeld voor het tijdig voorspellen van hoge waterstanden of de voorspelling van wervel-trajecten. Zeilers in de Bermuda/Cape Hatteras-regatta gebruiken de on-line informatie, aangevuld met meteorologische data, zelfs voor het uitstippelen van de meest gunstige route voor hun zeilreis.

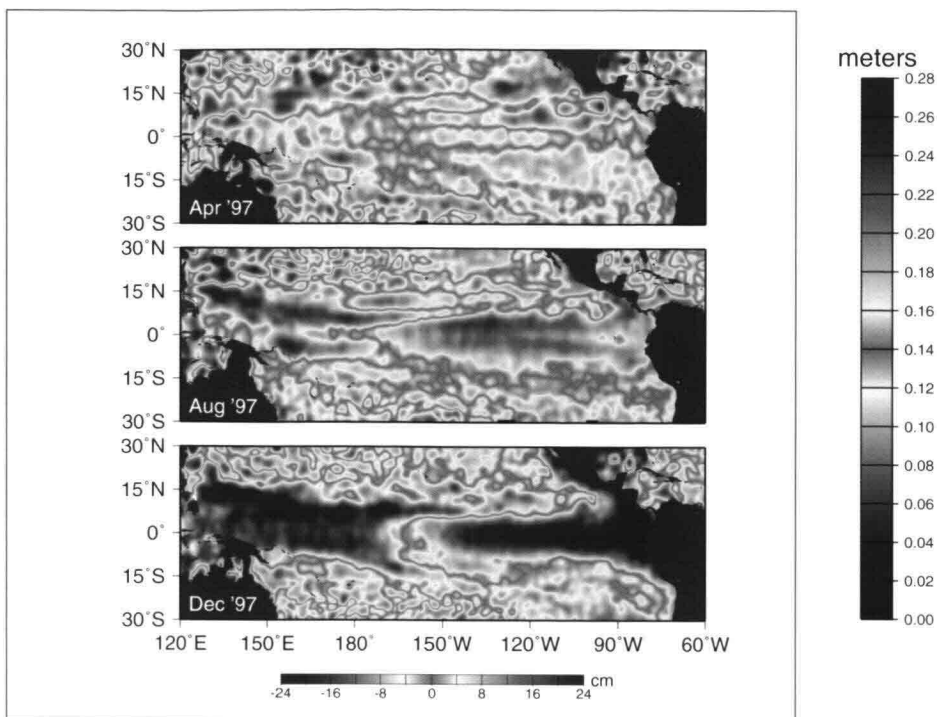
Onlangs heeft DEOS zich aangesloten bij NEONET, een initiatief van het ministerie van Verkeer en Waterstaat, de beleidscommissie Remote Sensing (BCRS) en de Stichting Ruimteonderzoek Nederland (SRON). NEONET staat voor 'Netherlands Earth Observation NETwork', en levert een infrastructuur aan Nederlandse gebruikers van aardobservatie-data (<http://www.neonet.nl>). Dit zijn zowel wetenschappers als operationele (en zelfs commerciële) gebruikers. Zo wordt tegemoetgekomen aan de lange-termijnvraag naar data, dataverwerkingsmethoden, en data-opslag.

Het Radar Altimeter Data Systeem (RADS) binnen NEONET geeft toegang tot gecorrigeerde hoogtemeterdata en afgeleide producten. Rijkswaterstaat is wederom een belangrijke afnemer. Zo wordt in het DATUM-project de mogelijkheid onderzocht om de gebruikelijke peilschaalwaarnemingen die worden gebruikt in een waterstandsmodel, aan te vullen met radar-hoogtemeterdata, en zo de ruimtelijke resolutie te verhogen. Ter plekke van de getijdstations kunnen de hoogtemetingen worden gekalibreerd en in het referentiesysteem van de stations worden gebracht. Vervolgens kunnen met behulp van de altimeterwaarnemingen de getijdstations aan elkaar worden geknoopt oftewel geïnterpoleerd.

Het combineren van metingen met een model ter verbetering van zowel de metingen als het model, staat bekend als 'data assimilatie'. Rijkswaterstaat gebruikt hiervoor het 'Continental Shelf Model' (CSM). Dit is een hydrodynamisch model waarmee men in staat is om het waterniveau en stormvloedten te voorspellen. Cruciaal hierbij is een goede kalibratie. Tot voor kort was dit een tijdsintensieve en handmatige bezigheid door het gebrek aan metingen op open zee. Het feit dat open zee-waarnemingen nu beschikbaar zijn in de vorm van radar hoogtemetingen, laat een getijdeweg eerder en beter voorspellen.



FIGUUR 6: Jaarlijkse cyclus in de globale waterstand, uitgesplitst in amplitude (boven) en fase in dagen na 1 januari (midden). Tevens is de helling ofwel de zeespiegelverandering weergegeven over de afgelopen vijf jaar (onder).



FIGUUR 7: Waterafstandsafwijkingen in de tropische Stille Oceaan in drie opeenvolgende perioden verraden de ontwikkeling van een El Niño.

Voorlopige simulaties en tests met echte data (waarbij de toekomst in het verleden ligt en dus bekend is) laten zien dat de toevoeging van altimetergegevens een verbetering van zo'n 15% oplevert, vergeleken met de situatie waarin alleen getijdestations worden gebruikt. De altimeter kan het getijdestation echter niet vervangen, omdat de ruimte-waarneming onbetrouwbaar wordt als de kust te dicht wordt genaderd. En juist hier zijn veel waarnemingen nodig, omdat dicht bij de kust de dynamica complexer wordt. De bottleneck vooralsnog voor de stormvloedvoorspelling is het tijdig beschikbaar komen van nauwkeurige radarhoogtemetingen.

Met het Radar Altimeter Database Systeem is het mogelijk semi-synoptische snapshots van de waterstand te berekenen, hiervan animaties te maken en seizoensvariaties, interjaarlijkse variaties, trends of juist hoge frequenties te extraheren. Als voorbeeld is in figuur 6 de jaarlijkse cyclus in de globale waterstand weergegeven. In feite is dit een sinussignaal met een bepaalde amplitude en fase. De amplitude zegt iets over de sterkte en de fase iets over het verloop, over welk moment de maximale sterkte wordt bereikt. Verder is de seculiere verandering of trend over de afgelopen vijf jaar gegeven, zoals die is berekend uit TOPEX/POSEIDON-data. Uit frequentie-analyses blijkt de jaarlijkse cyclus, ook wel aangeduid met seizoensvariatie, de belangrijkste component te zijn. Dit is niet zo verwonderlijk, omdat dit direct samenhangt met de opwarming en afkoeling tijdens de zomer en winter. Dit effect wordt versterkt in de nabijheid van grote landmassa's, omdat daar de temperatuur variatie groter is dan op zee. We zien dan ook voornamelijk verhoogde amplitudes op het noordelijk halfrond en in de westelijke grensstromen waarvan de Warme Golfstroom deel uitmaakt.

De faseplot, die ons aangeeft waar de maximale waterstand in het jaar ligt (ten opzichte van 1 januari), laat goed het verschil zien tussen het noordelijk en zuidelijk halfrond;

zo'n 180 dagen, precies het verschil tussen de zomers op het noordelijk en zuidelijk halfrond. Wie wat nauwkeuriger kijkt, zal ontdekken dat de response op de opwarming op het zuidelijk halfrond gemiddeld iets langer duurt. Er is hier dan ook een groter wateroppervlak op te warmen. Interessant zijn natuurlijk de afwijkingen van dit gemiddelde gedrag.

Tot slot de trend, oftewel seculiere verandering, in het zeeniveau over de afgelopen vijf jaar. Blijkbaar zijn er grote gebieden aan te wijzen waar gemiddeld het zeeniveau is gestegen, net zoals er gebieden zijn waarbij juist sprake is van een daling. Het gaat dus om lokale fenomenen. Zelfs wanneer bekend zou zijn dat het zeeniveau globaal stijgt met gemiddeld 2mm/jaar, zou men graag willen weten wat er lokaal gebeurt. Dit is natuurlijk ook een economisch vraagstuk: hoe ver hogen we de dijken op, zodat de Nederlanders droge voeten houden? Het wachten is op een veel langere dataset in de tijd, om de meerjaarlijkse variaties kwijt te raken. De analyse laat wel zien dat een nauwkeurigheid van 1 mm/jaar mogelijk is. Voor de Noordzee bedraagt de gemiddelde stijging op dit moment zo'n 3 mm/jaar. Langs de evenaar wordt de trend vertroebeld door het onregelmatig wederkeren van het verschijnsel El Niño.

Nog iets over El Niño: het zal iedereen niet ontgaan zijn dat de wereld onlangs de sterkste El Niño van de eeuw mocht beleven. Maar wat of wie is El Niño nu eigenlijk? El Niño wordt gekarakteriseerd door een abnormale toename van de temperatuur van het water in het oostelijk deel van de tropische Stille Oceaan. In een normale situatie blaast de wind naar het westen (oostelijke passatwinden) en stuwt zo relatief warm water naar het westen. Eens in de zoveel tijd, twee tot vier jaar, verzwakt de wind of draait zelfs, zodat de weg vrij is voor de warme poel om naar het oosten te bewegen. Dit gaat gepaard met equatoriale golfbewegingen in oostelijke richting: de Kelvin-golven. Tevens zal het water in het oosten stijgen, doordat de thermoklien, de diepte waar de grootste temperatuurgradiënt plaatsvindt, verder naar beneden zakt.

De impact van dit fenomeen is verre van lokaal. Waarschijnlijk is Europa het enige continent dat niet direct te leiden heeft onder de grillen van El Niño. Het belangrijkste gevolg van de verplaatsing van de warme-watermassa, is de verstoring van de atmosfeer en zo de verstoring van het neerslag patroon. De droogte in Indonesië en Noord-Brazilië heeft geleid tot enorme bosbranden, en de overstromingen in Peru hebben vele levens gekost. Ik spreek hier nog niet eens over de directe en indirecte wereldwijde economische gevolgen.

De radarhoogtemeter van onder andere ERS-2 registreert het fenomeen feilloos, zoals blijkt uit figuur 7. In drie opeenvolgende snapshots van de waterstandsafwijking zie je het zeeniveau stijgen nabij Zuid-Amerika. Assimilatie van de data in gekoppelde oceaana-atmosfeermodellen van dit gebied laat nu voorspellingen van zo'n drie tot zes maanden toe, en stelt regeringen in staat om vooraf maatregelen te nemen. Maar dit is natuurlijk nog niet goed genoeg. Er wordt gewerkt aan het verder verbeteren van de voorspellingen: wanneer, hoe sterk en hoe lang?

TENSLOTTE Het zal nu duidelijk zijn dat de satelliet meer in de waterspiegel zit dan alleen zichzelf. Aardobservatie-satellieten zijn van onschatbare waarde voor het in kaart brengen van ons leefmilieu. De radarhoogtemeter, al is het maar een klein onderdeel uit het arsenaal aan sensoren en meetinstrumenten dat ons ter beschikking staat, verschaft een bron van nuttige informatie over het aardse zwaartekrachtveld, de beweging van onze oceanen, en de beweging en het afsmelten van de poolkappen.

EEN

HOOG(WATER)STANDJE

De bepaling van maatgevende
hoogwaterafvoeren

16
T. Rientjes
C. van den Akker
P. van der Veer

• • •

Opnieuw laaide de discussie op over de veiligheid van de rivierdijken toen in 1995 door hoog water op de grote rivieren grote delen van Zuid-Nederland overstromden. Die situatie leidde toen tot dreigende dijkdoorbraken, grootschalige evacuatie en aanzienlijke schade. Hoofdoorzaak van de extreem hoge afvoer was de vele regen.

Het ontwerp van een dijk en daarmee de 'veilige' hoogte hangt samen met de zogeheten maatgevende afvoer: de afvoer met een statistisch berekende (herhalings)kans op het voorkomen van hoogwaters. Om de afvoeren in de Maas na langdurige regen te voorspellen hebben Rijkswaterstaat en de TU Delft gezamenlijk een wiskundig model ontwikkeld. Betrouwbare meerdaagse voorspellingen zijn mogelijk als deze modellen worden geïntegreerd in een Geografisch Informatie Systeem (GIS).

• • •

De hoogwaters van december 1993 en januari 1995 hebben grote gevolgen gehad voor Nederland als waterland. Veel materiële en immateriële schade is veroorzaakt door de overstroming van grote delen van Zuid-Nederland waar de Maas niet of onvoldoende bedijkt is. Door het hoge water in de Rijn moesten in 1995 in Zuidwest-Nederland preventief zelfs grootschalige evacuaties worden uitgevoerd. Door dreigende dijkdoorbraken kwam de primaire taak van Rijkswaterstaat om de veiligheid van de burgers te garanderen in het geding.

Sinds de hoogwaters van 1993 en 1995 is een discussie ontstaan over de veiligheid van de rivierdijken. Die veiligheid wordt vaak geassocieerd met de (ontwerp)hoogte van de dijk. De ontwerphoogte is daarbij gerelateerd aan de maatgevende afvoer van de rivier via de Q-h-relatie.

In dit artikel wordt ingegaan op de onvolkomenheden in de bepaling van de maatge-



Hoogwater bij fort Goilberdingen in de Diefdijklinie, Everdingen aan de Lek, 1993.

vende afvoer. Daarnaast wordt een beschrijving gegeven van het hydrologische gedrag van een stroomgebied als gevolg van langdurige regen en wordt het afvoer-voorspellingsmodel van de Maas besproken.

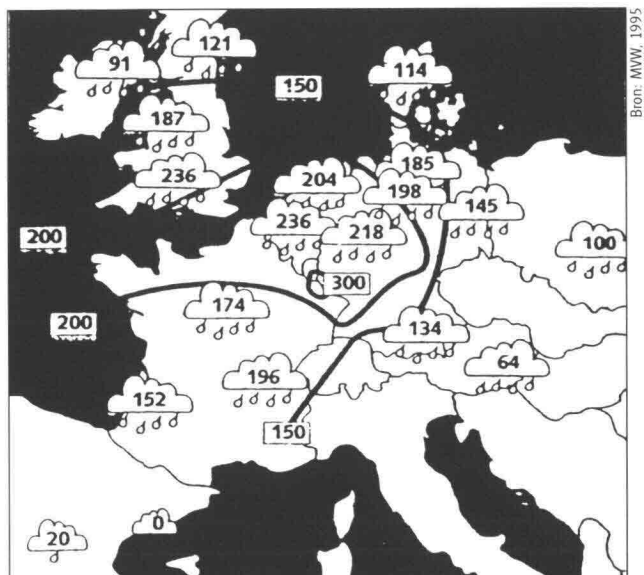
METEOROLOGISCHE OORZAKEN Tijdens de hoogwaters is veel gespeculeerd over de mogelijke oorzaken van de extreem hoge afvoeren. Maar vrij snel is duidelijk geworden dat de vele regen die met name in de Belgische Ardennen en in Noord-Frankrijk was gevallen de hoofdoorzaak vormde. Aanhoudende depressies boven de Noordzee zorgden ervoor dat meerdere randstoringen over België, Noord-Frankrijk en het midden en noordelijke deel van het Rijnstroomgebied trokken. In het stroomgebied van de Maas vielen daarom grote hoeveelheden regen. In RIZA [1995] wordt gesteld: "De oorzaak van het hoogwater in 1995 was de enorme hoeveelheid neerslag in het zuidelijke deel van het Maasstroomgebied. De afvoer uit Frankrijk maakte 60% uit van de topafvoer; op de Franse Maas en de Lesse zijn afvoerrecords gebroken." Uit analyse van neerslaggegevens is gebleken dat in de periode van 21 tot 30 januari ongeveer twee tot drie keer de normale hoeveelheid voor de maand januari is gevallen. Daarnaast is de ruimtelijke

variabiliteit van de neerslag over het Belgische deel van het Maasstroomgebied relatief klein geweest. In figuur 1 wordt dit neerslagpatroon geïllustreerd.

Het effect van deze neerslagverdeling op de afvoer van de stroomgebieden in de Belgische en Franse Ardennen is groot te noemen. Voor waterbeheerders is het daarom belangrijk te weten of de extreme neerslaggebeurtenissen van december 1993 en januari 1995 als maatgevend gezien moeten worden voor toekomstige neerslagpatronen. Over de mogelijke oorzaak van het ontstaan van de langdurige regens speculeren meteorologen. Door een mondiale klimaatverandering kunnen de weerpatronen in noordwest-Europa aan het veranderen zijn. Welke consequenties deze veranderingen hebben op de neerslag-afvoerrelatie in het stroomgebied van de Maas, is nog onduidelijk. Wel lijkt vast te staan dat het toekomstige klimaat in Zuid-Nederland en België vergelijkbaar zal zijn met het klimaat dat nu in Bordeaux (Frankrijk) aanwezig is.

MAATSCHAPPELIJK GEVOLGEN Als gevolg van de extreme hoogwaters zijn grote, onbedijkte delen van het Maasdal in Limburg onder water komen te staan. In het rapport *De Maas slaat toe* (RWS, 1993) wordt gemeld dat rond de 21.000 hectare, oftewel circa tien procent van het grondgebied van de provincie, is overstromd. Hoewel de overstromingen vooral plaats hebben gevonden in het onbedijkte winterbed, is de totale materiële schade geraamd op 265 miljoen gulden. In de volgende tabel is voor het hoogwater van 1993 de materiële schade weergegeven voor een aantal maatschappelijke sectoren.

Door de overstroming moesten in 1993 ongeveer 8.000 inwoners hun huis verlaten. De Commissie-Boertien II [1994] meldt: "De emotionele schade door de overstromingen is eveneens zeer groot geweest." De totale materiële en immateriële schade als gevolg van de hoogwaters van Rijn en Maas in 1995 in het zuidwesten van Nederland en in Limburg was echter nog vele malen groter. Door het extreme hoogwater op de Rijn



Bron: MWW, 1995

FIGUUR 1: Regenvall in januari 1995. De getallen geven het percentage van de normale hoeveelheid regen in januari aan.

| Sector | Schade van 1993 in miljoen guldens |
|---------------------------|---------------------------------------|
| Particulieren | 73,5 |
| Niet-agrarische bedrijven | 80,0 |
| Agrarische bedrijven | 22,0 |
| Gemeenten | 47,0 |
| Provincie Limburg | 1,0 |
| Rijkswaterstaat | 35,0 |
| Onderwijsinstellingen | 3,5 |
| Overigen | 2,5 |
| Totaal ca. | 265,0 |

Bron: MVW, 1994

moesten zelfs 200.000 mensen preventief worden geëvacueerd. Hierdoor werd de noodzaak nog eens onderstreept dat Nederland veilige dijken nodig heeft.

HET HYDROLOGISCHE STROOMGEBIEDSGEDRAG ALS GEVOLG VAN LANGDURIGE REGEN

Inzicht in het voorkomen van afvoerprocessen en het gedrag ervan is voornamelijk ontstaan in de jaren zeventig, door uitvoerige meetcampagnes en modelstudies in stroomgebieden in de VS (onder anderen Betson and Marius, 1969; Dunne en Black, 1970, a,b). Het voorkomen en het gedrag van de diverse afvoerprocessen is gerelateerd aan topografische en fysiografische stroomgebiedskarakteristieken en aan meteorologische omstandigheden. Figuur 2 geeft een vereenvoudigde schematische weergave van afvoerprocessen in hellende gebieden.

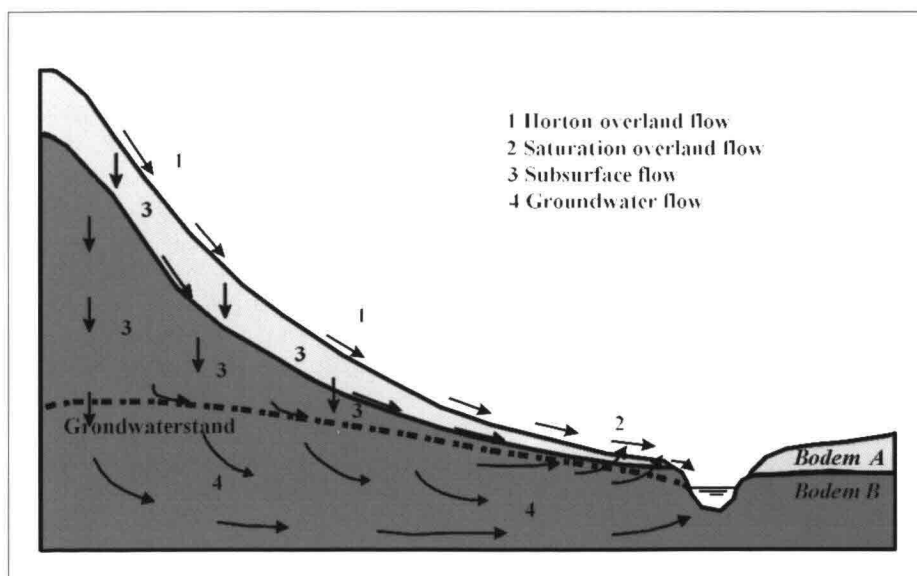
De belangrijkste afvoerprocessen worden hier kort beschreven. De snelste vorm van afvoer vindt plaats als water onvertraagd over het land naar het afwateringssysteem kan stromen. Deze vorm van afvoer wordt **overland flow** genoemd. Overland flow wordt onder andere gegenereerd als de neerslagintensiteit groter is dan de infiltratiecapaciteit. Deze vorm van afvoer wordt Horton overland flow genoemd. Een andere vorm van overland flow wordt **Saturation overland flow** genoemd. Deze vorm van afvoer ontstaat als bodemprofielen verzadigd raken met water. Door infiltratie van water aan het landoppervlak en door het lateraal toestromen van water van hoger gelegen hellingen kan een bodemprofiel (snel) verzadigd raken. Als een bodem geheel verzadigd is, zal bodemwater makkelijk kunnen exfiltreren en samen met het neerslagwater over het land tot afvoer kunnen komen. Saturation overland flow vormt een zeer belangrijk en dominant afvoerproces bij het ontstaan van piekafvoeren als gevolg van langdurige neerslag. Uit meetcampagnes is ook gebleken dat deze vorm van overland flow met name voorkomt in de omgeving van het afwateringssysteem. In figuur 3 is geïllustreerd dat verzadigde zones gedurende een neerslaggebeurtenis variabel in grootte kunnen zijn. Wat betreft de grootte van een hoogwater-afvoerdebiet kan men op fysisch realistische grondslag stellen dat er een duidelijke relatie bestaat tussen het oppervlak van de verzadigde zones en de grootte van het afvoerdebiet.

Behalve overland flow zijn er nog diverse afvoerprocessen belangrijk die tijdens langdurige neerslagperiodes met name in de bovenste bodemlagen waarneembaar zijn. Deze gezamenlijke processen staan bekend als de **subsurface flow**-processen. Aangezien deze processen veelal gelijktijdig optreden en elkaar onderling kunnen versterken, zijn de onderlinge afvoerbijdragen van deze processen moeilijk te kwantificeren.

Voor het stroomgebied van de Maas geldt dat met name de afvoeren uit de Franse en Belgische Ardennen bepalend zijn voor de grootte van het afvoerdebiet te Borgharen. In het Franse- en Belgische Ardennengebied stroomt het regenwater af naar de Maas via vele zijriviertjes (onder andere Chiers, Semois, Lesse, Sambre, Ourthre, Geul, Roer en Niers). Door de geologische en bodemkundige gesteldheid en door de steilheid van de stroomgebieden wordt weinig regenwater vastgehouden. Neerslagwater zal bij langdurige neerslag daarom in de vorm van saturation overland flow en subsurface flow zeer snel tot afvoer kunnen komen. Uit ervaring is bekend dat als het in Noord-Frankrijk en de Belgische Ardennen flink regent, de waterstand in Borgharen binnen twaalf uur snel toeneemt. In figuur 4 is te zien wat voor het hoogwater van 1995, zoals gemeten in Borgharen, de afvoerbijdragen van de diverse deelstroomgebieden zijn geweest.

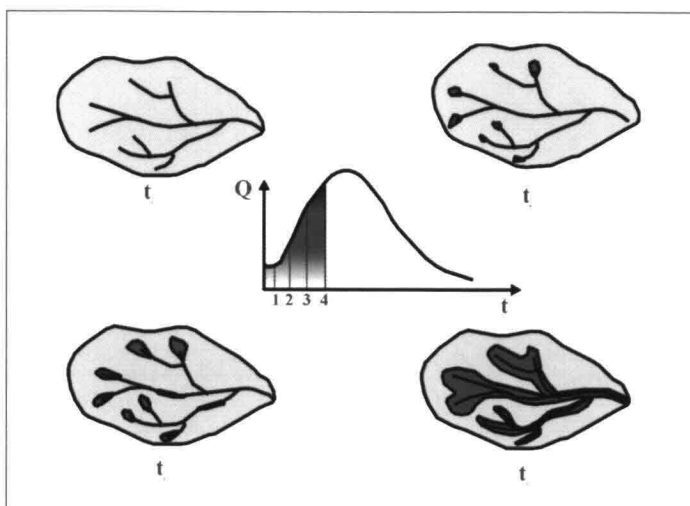
Veranderingen die in het stroomgebied van de Maas zijn ontstaan door menselijk handelen, kunnen het hydrologische gedrag sterk beïnvloeden. De Commissie-Boertien II [1994] heeft geïnventariseerd of in de Ardennen grote veranderingen in het landgebruik hebben plaatsgevonden. De commissie stelt: "Ofschoon er in de literatuur vrijwel altijd gesproken wordt van ontbossing in de Ardennen, blijkt er per saldo juist bos bijgekomen te zijn." De verandering van het areaal bosgebied heeft derhalve de (extreme) piekafvoeren van 1993 en 1995 niet versterkt. Op hydrologische grondslag zou eerder sprake moeten zijn van een verlaging van de piekafvoeren.

In de afgelopen decennia is echter het hydrologisch gedrag van de Ardense stroomgebieden wel sterk veranderd, door het gebruik van andere gewassen en door het moderniseren van landbouwbewerkingsmethoden. Beide veranderingen hebben als gevolg dat de opnamecapaciteit van de bodem voor regenwater lokaal (sterk) is afgenomen. Binnen de ruimtelijke schaal van een stroomgebied zal bij langdurige neerslag minder



FIGUUR 2: Schematische weergave van afvoerprocessen in een dwarsdoorsnede van een hellend gebied.

In 1993 moesten ongeveer achtduizend mensen hun huis verlaten, in 1995 zelfs tweehonderdduizend.



FIGUUR 3: Ontwikkeling van verzadigde gebiedszones rondom het hoofdafwateringssysteem.

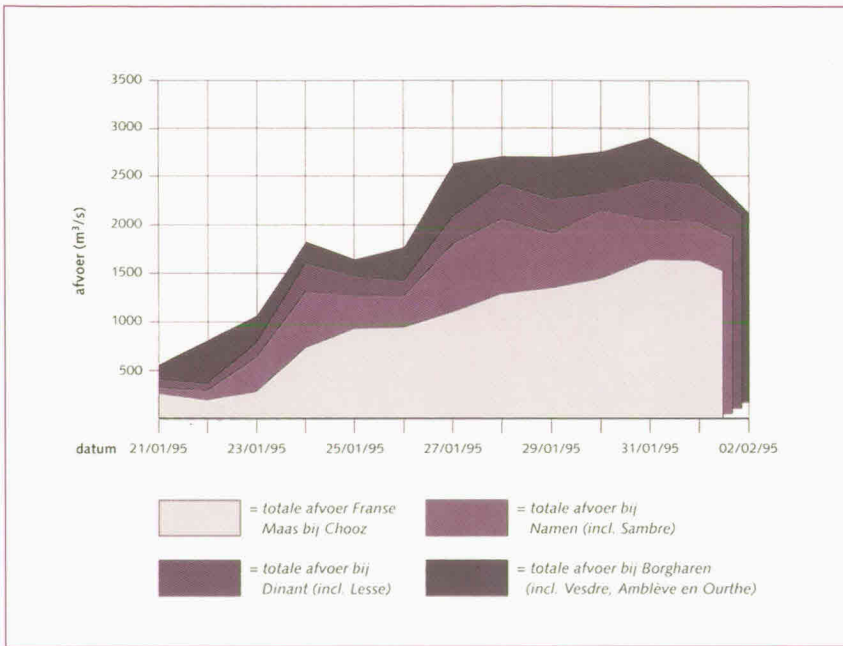
Bron: Hewlett and Nutter, 1970

water geborgen kunnen worden, waardoor regenwater sneller tot afvoer kan komen. Ook bij verstedelijking is sprake van een afname van de bergingscapaciteit van de bodem. Dat verstedelijking echter een significant effect heeft gehad op het ontstaan van extreme hoogwaterafvoeren, zoals die in 1993 en 1995 zijn waargenomen, is niet waarschijnlijk. Over een lange periode is het oppervlak verstedelijkt gebied slechts in beperkte mate toegenomen. Daarnaast is de afvoer karakteristiek van verhard gebied vergelijkbaar met de afvoer karakteristiek van volledig verzadigd gebied. Een verstedelijking in de Belgische Ardennen zal daarom alleen onder normale hydrologische omstandigheden een effect op afvoer verlopen kunnen hebben.

BEPALING MAATGEVENDE AFVOER In 1975 stelde de Commissie-Becht de maatgevende afvoer voor het bedijkte deel van de Rijn en de Maas een frequentie van voorkomen mag hebben van 1/1250 jaar, oftewel een herhalingsstijd van 1250 jaar. Vertaald naar de kans op voorkomen van een afvoer is dus te stellen dat de kans dat een dergelijke afvoer 1 keer per jaar voorkomt, kleiner moet zijn dan 0.08%. Om de frequentie van voorkomen van een afvoer te schatten, kan de herhalingsfrequentie van die afvoer berekend worden door frequentieanalyse van gemeten afvoeren.

Voor extreme afvoeren zoals die in 1993 en 1995 zijn waargenomen, voldoen de bestaande frequentieverdelingen echter niet goed. Het hydrologisch gedrag van een (groot) stroomgebied als gevolg van langdurige neerslag laat zich moeilijk vertalen naar een afvoer met een theoretische frequentie van voorkomen. Om te komen tot de bepaling van de maatgevende afvoer met een herhalingsstijd van 1250 jaar wordt, op statistische grondslag, een verdelingsfunctie samengesteld waarin afvoeren zijn uitgezet tegen bijbehorende herhalingsstijden. Uit de functie is voor een gekozen herhalingsstijd een maatgevende afvoer te bepalen. Veel gebruikte typen verdelingsfuncties zijn bijvoorbeeld de Pearson-III-verdeling, de Gumbel-verdeling en de log-normale-verdeling. Het gebruik van een verdelingsfunctie brengt enkele belangrijke nadelen met zich mee:

- Om een afvoer bij een gegeven herhalingsstijd op een goede statistische basis te kunnen bepalen, moet de meetreeks een periode van ten minste 10 keer de herhalingsstijd bevatten



FIGUUR 4: Opbouw van de afvoergolf van Borgharen voor het hoogwater 1995.

■ Statistische methoden behouden alleen geldigheid als de fysische omstandigheden van het stroomgebied niet veranderen gedurende de periode waarvoor de metingen beschikbaar zijn

■ Hoogwaters kunnen verschillende oorzaken hebben: onweersbuien in de zomer, langdurige depressieregens in de winter, sneeuwsmelt in de lente. Als metingen van piekafvoeren niet worden gescheiden op grond van meteorologische oorzaak, ontstaat een gemiddelde verdelingsfunctie of, bij wijze van voorstelling, een 'middelfunctie'. Het gebruik van deze functie voor de bepaling van ontwerpafvoeren is zeer discutabel, omdat van een gedifferentieerde 'oorzaak/gevolg'-relatie geen sprake is.

Het hydrologisch gedrag van een stroomgebied onder extreme meteorologische omstandigheden laat zich statistisch niet voorspellen in termen van ontwerpafvoeren. Sinds de hoogwaters van 1993 en 1995 zijn de beperkingen in het gebruik van maatgevende afvoeren voor de gekozen herhalings tijd wederom erkend. Begin 1993 werd op grond van de optredende hoogwaters tussen 1911 en 1993 de herhalingsfrequentie van een afvoer bij Borgharen zoals die van januari 1995, nog geschat op circa 1 maal per 100 jaar; die van de afvoer van december 1993 op circa 1 maal per 210 jaar. Na de hoogwaters zijn de geschatte herhalingsfrequenties toegenomen tot respectievelijk circa 1 maal per 65 jaar en circa 1 maal per 125 jaar (MVW, 1995). Voor het stroomgebied van de Maas geldt dat de bestaande verdelingsfuncties gebaseerd zijn op (veelal) te korte meetreeksen. Sinds de aanvang van afvoermetingen in Borgharen in 1911 hebben zich slechts enkele afvoersituaties voorgedaan, waarbij sprake is van een extreem hoogwaterafvoer, dat wil zeggen een afvoer $2500 \text{ m}^3/\text{s}$. Slechts de extreme hoogwaterafvoer die is gemeten in 1926, is daarbij van gelijke orde als de extreme hoogwaterafvoeren van 1993 en 1995.

Bij het gebruik van een vastgestelde verdelingsfunctie voor de bepaling van de maatgevende afvoer, wordt een regelmaat in rivierafvoeren gezocht zonder daarbij rekening

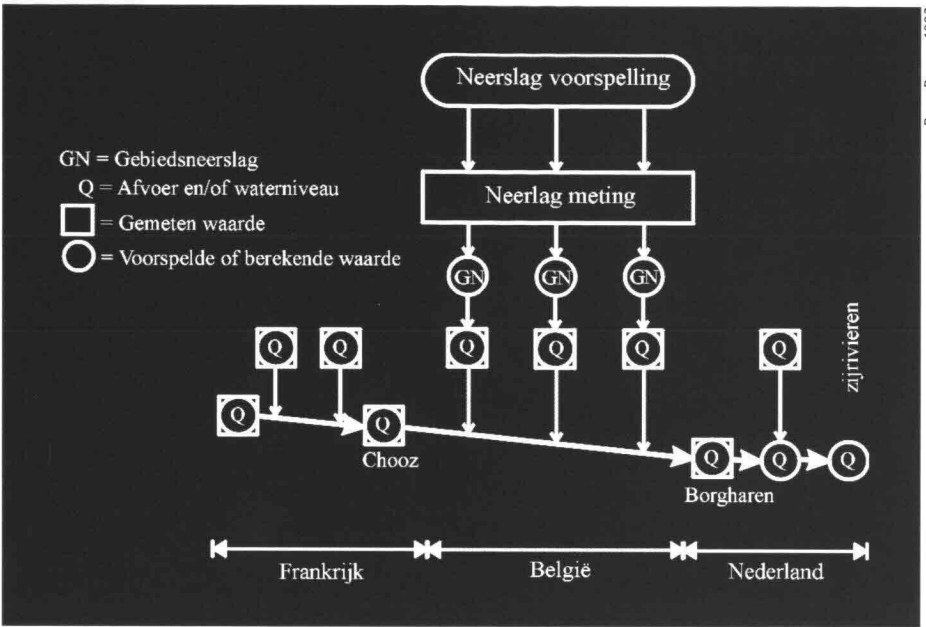
te houden met de hoogdynamische en sterk niet-lineaire, plaatsgebonden afvoerprocessen die ten grondslag liggen aan de rivierafvoeren. Daarnaast moet gerealiseerd worden dat het stroomgebied van de Maas onderhevig is geweest aan veranderingen van landgebruik en mogelijk het klimaat. De effecten van deze veranderingen zijn vooralsnog niet kwantificeerbaar in termen van een toename of afname van de afvoer, aangezien wederom geen afvoermetingen beschikbaar zijn.

De Commissie-Boertien II [1994] schrijft: 'Met de onzekerheden in de ontwerp-afvoeren van Rijn en Maas is tot dusver bij het ontwerpen van rivierdijken niet of nauwelijks rekening gehouden.' Voor een betere bepaling van de maatgevende afvoer moet eerst een methodiek worden ontwikkeld, waarbij de berekende afvoeren fysisch onderbouwd zijn. Daarom zal voor een (afvoer)procesgerichte aanpak gekozen moeten worden. Dat wil zeggen: hydrologische en meteorologische processen die tijdens hoogwater binnen een stroomgebied een dominante rol spelen, zullen beter beschreven en gemodelleerd moeten worden. Mogelijk kunnen de effecten van extreme neerslaggebeurtenissen op afvoer bepaald worden met een Monte Carlo-simulatietechniek. Kunstmatig gegenereerde neerslagreeksen moeten dan in een neerslag-afvoermodel ingevoerd worden om de extreme afvoeren te kunnen berekenen. Mogelijk kan op deze wijze een nieuwe frequentieverdeling van afvoeren worden gemaakt voor de bepaling van de maatgevende afvoer.

NOODZAAK TOT MODELLEREN VAN DE NEERSLAG-AFVOERRELATIE Voor het voorspellen van afvoeren op de Maas zijn, in onderlinge samenwerking, door het RIZA en de TU-Delft wiskundige voorspellingsmodellen ontwikkeld. Met het model FLOFOM (FLOod FOrecasting river Meuse, Berger, 1992) worden de afvoeren in de rivier de Maas voorspeld. Voor het modelleren van neerslag-afvoerprocessen dient in feite echter voor elk afvoerproces een model ontwikkeld te worden, waarin de effecten van de topografische en fysiografische stroomgebiedskarakteristieken op de afvoer en de meteorologische omstandigheden zijn opgenomen. In FLOFOM is voor een relatief simpel model gekozen, omdat afvoervoorspellingen in real time uitgevoerd moeten worden en omdat er onvoldoende gegevens over de topografie en fysiografie van het Maasstroomgebied beschikbaar zijn om een procesgebaseerd model te kunnen ontwikkelen.

In FLOFOM wordt voor het Franse deel van de Maas een **Multiple Linear Regression**-model gebruikt. Bij het Belgische deel van de Maas zijn voor de afzonderlijke stroomgebieden neerslag-afvoermodellen ontwikkeld, die gebaseerd zijn op de **Nash cascade**-modellen. De afvoer van deze deelstroomgebieden vormt de modelinvoer voor een eendimensionaal hydraulisch stroommodel van de rivier de Maas. Voor het Nederlandse deel van de Maas is ook een hydraulisch eendimensionaal stroommodel ontwikkeld. In figuur 5 wordt schematisch weergegeven welke variabelen in het FLOFOM-model gemeten en berekend worden.

Een beperking in de toepassing van het FLOFOM-model vormt de beperkte zichtlengte. Aangezien regenwater relatief zeer snel tot afvoer komt, is het moeilijk om betrouwbare voorspellingen te doen. Voor het FLOFOM-model zijn de zichtlengten en de nauwkeurigheid voor de hoogwater-afvoervoorspelling bij Borgharen als volgt:



FIGUUR 5: Schematische weergave van benodigde en berekende gegevens van het FLOFOM-model (Berger, 1992)

| zichtlengte | nauwkeurigheid |
|-------------|----------------|
| 6 uur | 10 cm |
| 12 uur | 15 cm |
| 24 uur | 40 cm |
| 36 uur | 100 cm |

Bron: MVW, 1994

Een verbetering van de zichtlengte hangt nauw samen met het beter kunnen voorspellen van de neerslagverdelingen en het beter kunnen voorspellen van afvoeren. Een wetenschappelijk model van FLOFOM maakt gebruik van een beperkt aantal stroomgebiedsgegevens met (sterk) geschematiseerde afvoerrelaties. Zoals beschreven is het werkelijke afvoergedrag echter veel complexer. Afvoer-meetgegevens vertegenwoordigen per definitie alle stroomgebiedsgegevens en representeren ook de (soms complexe) relaties tussen gegevens en processen. Er bestaat daarom een spanningsveld tussen modelgegevens en meetgegevens die voor modelcalibratie gebruikt worden. Dit spanningsveld kan zich uiten in onbetrouwbare modeluitkomsten.

Een neerslag-afvoermodel als FLOFOM zou zodanig aangepast of uitgebreid moeten worden dat uitkomsten betrouwbaarder zijn. In dit verband denken de auteurs dat afvoervoorspellingen verbeterd kunnen worden door gebruik te maken van neurale netwerken. Neurale netwerken zijn geschikt voor simulatie van systemen met grote complexiteit. Het Maasstroomgebied is zo'n systeem, aangezien de afvoerbijdragen van de diverse deelstroomgebieden bijdragen tot de totale afvoer van het Maasstroomgebied. Het gebruik van een neurale netwerk voor simulatie van het gedrag van een geheel watersysteem heeft als voordeel dat zeer snel afvoervoorspellingen verkregen kunnen

worden. Bij de huidige stand in de techniek is echter nog het nadeel dat met zo'n systeem de parameteranalyses niet meer eenvoudig op generieke wijze uitvoerbaar zijn. Stroomgebiedsgegevens zijn immers niet als zodanig herkenbaar in het voorspellings-systeem. Naar oplossingen daarvoor wordt momenteel onderzoek gedaan.

Een tweede beperking in het gebruik van FLOFOM heeft betrekking op het modelleren van de heterogeniteit van stroomgebiedskarakteristieken en neerslagpatronen. Door de conceptuele aannamen in het model kunnen de stroomgebiedsheterogeniteiten niet gemodelleerd worden, waardoor het model niet geschikt is om effecten van veranderingen in landgebruik en klimaat op de afvoer te voorspellen. Om gebiedsheterogeniteiten wel te kunnen modelleren moeten fysisch gebaseerde modellen gehanteerd worden, waarbij het modeldomein ruimtelijk gediscretiseerd is. Door de ruimtelijke discretisatie kunnen modelresultaten en meetgegevens van plaatsvariabelen vergeleken worden. Voorwaarde is echter wel dat de fysiografie, topografie en meteorologie met voldoende detail gemeten en bepaald kunnen worden. Hiermee wordt echter direct de beperking in de toepasbaarheid van deze computercodes gegeven. Voor modelstudies zijn grote hoeveelheden stroomgebiedsgegevens benodigd om de (hoog)dynamische, veelal interacterende en elkaar versterkende afvoerprocessen te kunnen beschrijven. Andere praktische problemen vormen bijvoorbeeld de beschikbaarheid van een computercode gebaseerd op een valide conceptueel denkmodel en de grote behoefte aan rekentijd. Modelmatig kan een verbeterd inzicht in het hydrologische en hydraulisch stroomgebiedsgedrag worden verkregen door de integratie van wiskundige modellen in Geografische Informatie Systemen (GIS). Dit is noodzakelijk om tot betere beschrijving van een stroomgebiedsysteem en de aanwezige afvoerprocessen te komen.

TENSLLOTTE Een GIS is aantrekkelijk voor het verwerken van gegevens uit modelberekeningen. In de huidige beroepspraktijk zijn er echter beperkingen in de integreerbaarheid van wiskundige modellen in een GIS. De beperkingen liggen onder meer op het gebied van systeemprestaties, als in GIS geïntegreerde wiskundige modellen onderdeel uitmaken van een beslissingsondersteunend systeem. Als bij modelberekeningen gebruik wordt gemaakt van de in GIS-shells aanwezige programmeertalen, levert het geïntegreerde systeem qua snelheid in het algemeen een niet-gewenste prestatie. Koppeling van een wiskundig model aan een GIS-shell is een fundamenteel aanzienlijk betere oplossing, maar stelt wel bijzondere eisen. Voor het bereiken van hoge systeemprestaties is meer nodig dan het eenvoudigweg in of aan elkaar knopen van een wiskundig model en een GIS-shell. Bijzondere aandacht is nodig voor communicatie tussen, en waar mogelijk parallele, gegevensverwerking van programma-onderdelen.

De Commissie-Boertien II [1994] schrijft: "De onzekerheid over modelvoorspellingen kan op langere termijn gereduceerd worden door meer inzicht in het hydrologisch/hydraulisch gedrag van de rivieren." De auteurs stellen dat door ontwikkeling van verbeterde wiskundige modellen en integratie daarvan in een Geografisch Informatie Systeem een beter inzicht in het hydraulisch en hydrologisch gedrag kan worden verkregen.

REFERENTIES

- Berger, H.E.J., 1992. Flow Forecasting for the river Meuse, Ph.D. thesis, Technische Universiteit Delft.
- Betson, R.P. and Marius, J.B., 1969 Source areas of storm runoff. *Water Resources Research*, Vol.5, No.3, p.574-582.
- Commissie Boertien II, 1994. Onderzoek Watersnood Maas, Hoofdrapport De Maas Meester; Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Dunne, T. and Black, R.D., 1970a. An experimental investigation of runoff production in permeable soils. *Water Resources Research*, Vol.6, p.478-490.
- Dunne, T. and Black, R.D., 1970b. Partial area contributions to storm runoff. *Water Resources Research*, Vol.6, p.1296-1311.
- Hewlett, J.D. en W.L. Nutter, 1970. The varying source area of streamflow from upland basins; in: Paper presented at Symposium on Interdisciplinary Aspects of Watershed Management, Montana State University, Bozeman, American Society of Civil Engineers, New York, pag 65-83.
- MVW, 1994. De Maas slaat toe.... Verslag hoogwater Maas december 1993. Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Directie Limburg.
- MVW, 1995. De Maas slaat weer toe.... Verslag hoogwater Maas januari/februari 1995. Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Directie Limburg.
- RIZA, 1995. Verslag Hoogwater 1995, Evaluatie van de berichtgeving door het RIZA. RIZA, Arnhem.

NAAR **ÉÉN** BESLISMODEL
VOOR DE VEILIGHEID

Rijkswaterstaat en de kansberekening

J.K. Vrijling
J. Stoop

* * *

Veiligheid speelt een belangrijke rol in zowel de luchtvaart, het waterbeheer, de infrastructuur als in de ruimtelijke ordening.

Maar in de praktijk is er voor de beoordeling van veiligheid, de kansrekening, een veelheid van normen, benaderingen, methoden en technieken. Heeft Rijkswaterstaat behoefte aan één generiek beslismodel dat toepasbaar is voor uiteenlopende technische systemen en bijbehorende kunstwerken? Hier wordt het raamwerk voor een samenhangende veiligheidsfilosofie geschetst. Om dat optimaal te maken, zo stellen de auteurs, zou de aandacht moeten worden verbreed. Behalve de artefacten (bouwwerken en machines) moet ook de organisatie, de locatie of route en de rampbestrijding en hulpverlening in het ontwerp worden betrokken. In 1989 bracht het ministerie van VROM de nota 'Omgaan met risico's' uit. Van het daarin voorgestelde beleid werden de waterkeringen uitgezonderd. Dit hoofdstuk tracht de samenhang te schetsen tussen enkele andere maatschappelijke risico's. Een bijdrage uit Delft aan de nationale veiligheidsdiscussie.

* * *

Gedurende een groot deel van zijn bestaan heeft Rijkswaterstaat geworsteld met en gebruik gemaakt van de kansberekening.

De Stormvloed Commissie van 1916 kon er niet omheen. Door middel van extrapolatie toonde zij aan dat de hoogwaterstand bij Hoek van Holland nimmer een niveau van NAP+3.5 kon overschrijden. Maar de Afsluitdijk werd nog ontworpen zonder gebruik te maken van de kansrekening. De hoogst bekende waterstand vormde de basis voor de bepaling van de hoogte.

De motie-De Muralt/Bongaerts, die het effect van een doorbraak van de Afsluitdijk op

de dimensionering van de IJsselmeerdijken onderzocht wilde zien, worstelde met vier scenario's volgens de matrix: een klein of groot gat en een kort- of langdurende storm. Een vraagstelling die alleen met kansrekening goed kan worden geanalyseerd, maar die was nog niet zover ontwikkeld.

De Rijkswaterstaatsingenieur P.J. Wemelsfelder paste in 1939 een exponentiële verdeling toe door de waarnemingspunten van de stormvloedstanden van de laatste honderd jaar. Het bleek dat er een goede overeenkomst was tussen deze theoretische kansverdeling en de waarnemingen. Dit kon een basis zijn voor de extrapolatie naar een ontwerpwaterstand met een zeer geringe kans van overschrijden. De te kiezen aanvaardbare overschrijdingskans, het veiligheidsniveau, vormde echter een groot probleem. Wemelsfelder kwam tot het oordeel dat een frequentie van 1% per eeuw aanvaardbaar kon worden genoemd.

Prof. dr. D. van Dantzig, directeur van het Mathematisch Centrum in Amsterdam, loste het probleem van de keuze bijzonder elegant op. Hij formuleerde een beslissingsprobleem, waarin uitgaven aan dijkversterking gecompenseerd werden door de verkleining van de kans op overstromingsschade. Voor het eerst is hier sprake van een veiligheidsfilosofie.

Bij het ontwerp van de stormvloedkering in de Oosterschelde (SVKO in het jargon) werd op basis van de statistiek van stormvloedstanden en door de toepassing van de kansrekening, eerst de kansdichtheidsfunctie van de bijbehorende golfhoogten vastgesteld en vervolgens de overschrijdingslijn van de totale horizontale belasting door verval en golven. De kansrekening, aangevuld met de beslissingstheoretische concepten van Van Dantzig, vormde voor een deel de basis van het ontwerp. Een combinatie van instrumenten die later als 'probabilistisch ontwerpen' op de TU Delft werd geïntroduceerd. De verspreiding van de technieken werd sterk gestimuleerd door de ontwerp-competitie voor de bouw van de stormvloedkering in de Waterweg. Het ontwerp moest met behulp van probabilistische technieken worden uitgevoerd om aansluiting te kunnen vinden bij de door Rijkswaterstaat geformuleerde eisen.

Behalve bij de toepassing in het ontwerp van grote werken, drong het gedachtengoed ook door in de waterkeringswereld, via de oprichting van een werkgroep Probabilistische Methoden onder de Technische Adviescommissie voor de Waterkering, en uiteindelijk zelfs in de Wet op de Waterkering.

In 1993 werd een geheel ander terrein betreden. Al een aantal jaren kampte de Rijkswaterstaat met budgetoverschrijdingen bij het plannen en uitvoeren van grote infrastructurele werken. Na een inventariserende studie startte het Project Ramingen Infrastructuur. Een onderdeel daarvan vormde het ontwikkelen van een probabilistische ramings- en planningsmethode. Deze methode werd vervolgens uitgedragen onder de kostprijsdeskundigen van de Rijkswaterstaat en inmiddels is het gebruikelijk om bij ramingen een betrouwbaarheidsmarge aan te geven.

In dezelfde periode werd het project Veiligheid Vervoer te water uitgevoerd, waarin voor alle belangrijke vaarwegen in Nederland het gevaar van het vervoer van gevaarlijke chemische stoffen per binnenschip voor de omwonenden werd berekend. Daar werd ook ontdekt dat de door het Ministerie van VROM geformuleerde normen voor aanvaardbaar risico van chemische installaties, niet zonder meer toepasbaar waren. Vergelijkbare studies worden uitgevoerd voor het Vervoer over de weg.

Bij de studies voor de uitbreiding van Schiphol met een vijfde baan bleek dat de luchthaven niet aan de VROM-norm voldeed. Rijkswaterstaat controleerde en bevestigde als deskundige de berekeningen, maar de ramp met de El-Al Boeing haalde de problematiek uit de studeerkamer en bracht haar in de openbare discussie.



Vervoer van gevaarlijk stoffen met tankwagens.

Uit de voorbeelden blijkt dat in de ruimtelijke ordening, de verkeersinfrastructuur en in het waterbeheer, veiligheid van oudsher een belangrijke rol speelt. De accenten in veiligheid lijken verschillend te liggen en te worden bepaald door de specifieke aard van de inrichting en de mogelijke gevolgen.

Bij de dijkenbouw staat het bezwijken van de dijken en de mogelijk grote verliezen aan have en goed centraal, naast de mogelijke ontruiming bij dreigende hoogwatersituaties. Bij infrastructurele werken speelt de veiligheid van de gebruikers en de omgeving een belangrijke rol. Het vervoer van gevaarlijke stoffen op de hoofdtransportassen in ons land werd al genoemd, maar ook bij ondergrondse infrastructuur is veiligheid een aandachtspunt, zeker na de brand in de Kanaaltunnel. Bij grootschalige ongevallen in de luchtvaart en scheepvaart staan de hulpverlening en rampenbestrijding in de aandacht van de media. Bij de infrastructuur als bebouwde omgeving ten slotte spelen de sociale veiligheid en het handhaven van de openbare orde een rol.

In de praktijk is in veel domeinen en disciplines een verscheidenheid aan normen, benaderingen, methoden en technieken ontstaan, die elk een eigen specifiek toepassings- en geldigheidsgebied lijken te kennen.

In wetenschappelijk kringen hanteert men een probabilistische invalshoek, terwijl de deterministische traditie wordt vertegenwoordigd door de wereld van de arbeidsomstandigheden en de hulpverlenings- en rampenbestrijdingsorganisaties.

EENHEID OF VERSCHIEDENHEID? Hoewel de veiligheidsbenaderingen per project en toepassing lijken te verschillen, hebben ze één ding gemeen: ze richten zich op besluitvormingsvraagstukken waarin kosten en baten in de ruimste zin worden afgewogen.

Een drietal punten komt steeds terug:

- de aandacht voor veiligheid is onderhevig aan een soms kortstondige, maar intensieve publieke aandacht op grond van ernstige ongevallen of dreigende situaties met grootschalige gevolgen. De invloed van het rivierhoogwater in '95 op de besluitvorming was aanmerkelijk.
- de behoefte aan rationele en voorspelbare besluitvorming over (grote) projecten, waarin maatschappelijke standpunten en invloeden een belangrijke rol spelen. De maatschappelijke kosten van uitstel of afstel op een betrekkelijk laat moment zijn immers aanzienlijk.
- veiligheid wordt door het publiek ruim gedefinieerd en kent aspecten als technische veiligheid, arbeidsomstandigheden, omgevingsveiligheid, hulpverlening en rampenbestrijding.

Voor de Rijkswaterstaat lijkt hiermee behoefte te bestaan aan een generiek beslismodel voor de beoordeling van veiligheid van technische systemen en de bijbehorende kunstwerken in een maatschappelijke context. Een dergelijk beslismodel maakt veiligheid toegankelijk als een aspect van de strategische afweging.

EEN SCHETS VOOR EEN RAAMWERK

In de behoeftenhiërarchie van de psycholoog A.H. Maslow komt de behoefte aan veiligheid op de tweede plaats, na de fysiologische behoeften (voedsel en onderdak) - iets dat duidelijk maakt dat het hier om een basisgoed gaat dat de mens moeilijk kan ontberen. De mens heeft er behoefte aan dat de altijd optredende afwijkingen (met name negatieve) ten opzichte van het plan beperkt blijven (bedrijfszekerheid), en dat de frequentie van voorkomen van desastreuze afwijkingen klein is (veiligheid).

Omdat de schaarse middelen eerst worden aangewend voor voedsel en onderdak, moeten bestedingen en investeringen om afwijkingen van het plan te bestrijden worden beoordeeld in een economische kosten en baten-afweging.

Zo hebben mens en samenleving zich steeds moeten afvragen of zij zich een bescherming tegen honger en ziekte, tegen roofdier en medemens en tegen natuurlijke rampen als een tekort of een overvloed aan water, aardbevingen en branden konden veroorzaken. In de loop der tijd heeft men een scala van preventieve maatregelen genomen, zoals vergroting van voedselproductie en -opslag, hygiëne, sociale organisatie, verdedigingsmacht, de aanleg van dammen en dijken en ruimtelijke ordening.

Ook de beperking van de gevolgen kreeg aandacht door het inrichten van hulpverleningsdiensten en soms zelfs door evacuatie.

Op den duur worden de systemen voor de economische productie en ter beperking van de afwijkingen zo groot en potentieel gevaarlijk, dat zij een tweede klasse van antropogene bedreigingen gaan vormen naast de natuurlijke. Een hoge dam met een stuwmeer van enkele km³ inhoud, een op de zee gewonnen polder, een grote hoge druk stoomketel, industriële chemische processen, het transport van gevaarlijke chemicaliën, de omvang, de schaal en de snelheid van zeevaart, spoor-, weg- en luchtverkeer vormen alle elementen, die kleinere of grotere afwijkingen van de gewenste toestand kunnen veroorzaken. Kleine afwijkingen beïnvloeden de efficiency van het economische proces en dienen in dat kader gezien te worden (bedrijfszekerheid). Grote afwijkingen veroorzaken schade aan mens, maatschappij en omgeving. Zij zijn dus een bedreiging voor de veiligheid.

Op grond van ingenieursinzicht enerzijds en voorvallen of ongevallen anderzijds, zijn in de ontwerpen van de systemen aanpassingen uitgevoerd om de afwijkingen en de

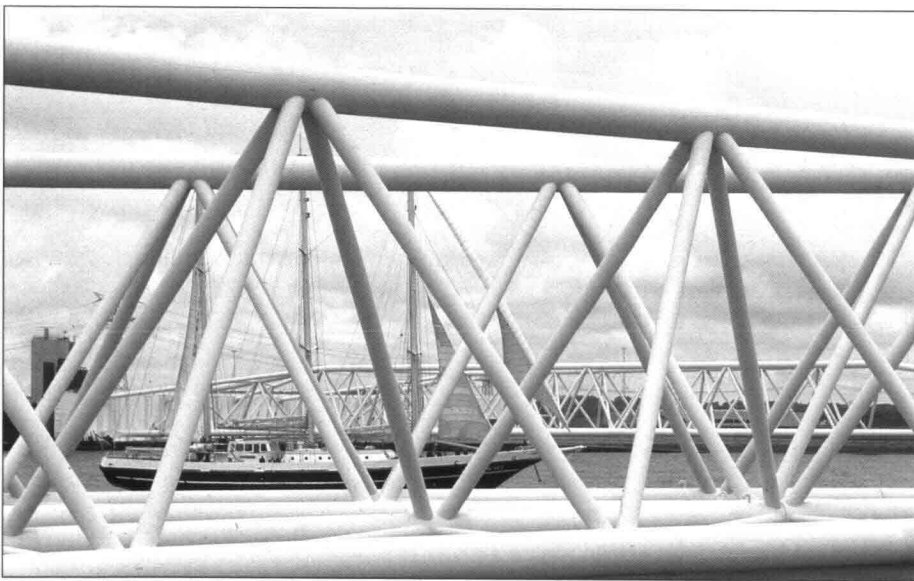
gevolgen ervan te beperken. Daarbij is, zoals reeds in de inleiding is gesteld, een veelheid van oplossingen ontstaan, die deels kenmerkend lijken voor de verschillende domeinen.

Die veelheid is in zoverre schijn, dat bij elk ontwerp afwijkingen in een vijftal achtereenvolgende lagen bestreden kunnen worden.

Een ontwerp betreft in feite de vormgeving van een voortbrengingsproces. Traditioneel gaat de aandacht hierbij vooral uit naar de machines en de bouwwerken, de *artefacten*. Om de artefacten te laten functioneren, is echter ook een *organisatie* nodig, die eigenlijk gelijktijdig moet worden ontworpen. Er dient een *locatie* of een *route* te worden gekozen om het proces efficiënt te laten verlopen.

Op elk van deze drie niveaus kunnen afwijkingen ontstaan en worden bestreden.

Als er onverhoopt toch grote ongunstige afwijkingen ontstaan, kunnen op de niveaus *rampbestrijding* en *hulpverlening* de gevolgen worden beperkt.



© Jurjen Drieth

Stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg, de laatste in een reeks grootschalige maatregelen om Nederland tegen het wassende water te beschermen.

In de waterkeringswereld wordt de veiligheid tegen overstroming vooral beoordeeld aan de hand van het artefact, de dijk. De organisatie, die in tijd van nood de kering kan versterken en aan rampbestrijding doet door evacuatie, maakt geen deel uit van het ontwerp. Geheel anders ligt het in de luchtvaart, waar de vijf lagen in samenhang zijn vormgegeven. Een extreem veilig artefact, het vliegtuig, een goed ontworpen infrastructuur, een strakke organisatie in de lucht en op de grond, een rampbestrijding door ontworpen evacuatie en hulpverlening op de grond in de vorm van brandweer en ziekenauto. Het belangrijkste verschil is dus dat in sommige domeinen traditioneel niet alle lagen expliciet worden ingevuld.

Een ander verschil is dat de risicodragers niet in gelijke mate door de afwijkingen en de effecten worden geraakt. Te onderscheiden zijn: het individu, de maatschappij, de bezittingen en het milieu.

Een giftige gaswolk in de nabijheid van een woonkern bedreigt het leven van individuen en daarmee een groep van de maatschappij. Een overstroming veroorzaakt behalve doden, ook grote materiële schade aan de bezittingen. Men moet zich realiseren dat voor de beoordeling de werkelijke voetafdruk van de afwijking van belang is. De beperking tot het aantal doden (VROM) of de materiële schade (Van Dantzig) is slechts een schematisatie en kan een beperkte weergave zijn van de publieke emotie.

Verder kan men bij individuen nog onderscheid maken naar hun betrokkenheid bij het proces en de daaraan gerelateerde frequentie van blootstelling aan afwijkingen. In volgorde van afnemende betrokkenheid: het personeel, de gebruikers, derden. Voor de luchtvaart zijn dat de bemanning, de passagiers en de bewoners onder het vluchtpad. De luchtvaart concentreert zich van oudsher op de veiligheid van bemanning en passagiers. De veiligheid van derden is voor deze industrie een nieuw aspect, terwijl dit voor het ministerie van VROM uit hoofde van zijn taak het enige is.

Hoewel de besluitvorming over de vereiste veiligheid een onderdeel is van de brede kosten en baten-afweging van het project, ligt ook hier verwarring op de loer. Het maakt immers verschil of een onderneming een micro-economische rendementsbeschouwing maakt, waarin alleen in geld om te zetten baten tellen, of dat de overheid macro-economisch de kosten tegen de baten afweegt. In dat laatste geval kan een verliesgevend project toch gewenst zijn, omdat het beleidsdoelen dient als economische groei, werkgelegenheid en een evenwichtige betalingsbalans.

Uiteindelijk is er het politieke besluitvormingsniveau, waarop behalve alle voorgaande elementen, ook moeilijk weegbare aspecten als natuur, gezondheid, cultuur en nationale eer meetellen.

De drie niveaus kennen elk hun instrument: de rendementsberekening, de kosten en baten-analyse en de multicriteria analyse. Een concentrisch systeem van beschouwingwijzen en methoden, die in beginsel elk tot een ander besluit leiden.

Waar de afweging van de beperking van kleine afwijkingen (bedrijfszekerheid) op (micro)economisch niveau kan plaatsvinden, geldt voor de besluitvorming over de aanvaardbaarheid van grote afwijkingen waarbij grote materiële gevolgen en doden zijn te betreuren, meestal het politieke niveau.

Aangezien de politiek haar besluitvorming zal willen uitstellen tot het moment waarop het beeld van kosten en baten in de breedste zin compleet is, moeten diensten als Rijkswaterstaat modellen ontwikkelen om met redelijke nauwkeurigheid de uitkomst van de politieke afweging te voorspellen. Voor een goed ontwerp dient het besluit bekend te zijn en omgekeerd; een vicieuze cirkel die doorbroken moet worden.

Bij besluitvorming over veiligheid of aanvaardbare risico's vindt men in het algemeen in de literatuur twee gezichtspunten.

Het eerste gezichtspunt is dat van een persoon die besluit om een activiteit te ondernemen, na een afweging van de risico's tegen de directe en indirecte persoonlijke voordelen. Deze opvatting kent haar conceptuele uitwerking in de vorm van individuele nutsfuncties. Een belangrijk aspect hierbij is de vrijwilligheid waarmee het besluit wordt genomen en het risico aanvaard. In de persoonlijke sfeer worden dergelijke beslissingen genomen in de wetenschap dat zij snel kunnen worden bijgesteld op grond van de opgedane ervaringen. In het geval van maatschappelijke besluitvorming over risico's kan een individu nog steeds zijn afwegingen maken op grond van zijn eigen waardenstelsel, maar zijn invloed op de uiteindelijke uitkomst is democratisch begrensd. Dit brengt een element van onvrijwilligheid met zich mee en dwingt tot een sceptische

houding ten opzichte van maatschappelijke beslissingen en daarmee verbonden risico's.

Uit het voorgaande volgen twee karakteristieken:

- het besluit om een risico te aanvaarden, heeft een kosten en baten-karakter
- de graad van vrijwilligheid speelt een rol bij de aanvaarding van een risico.

Het eerste gezichtspunt leidt tot een persoonlijk aanvaardbaar risiconiveau oftewel Individueel Risico (IR), waarbij alleen de dood als gevolg wordt beschouwd.

De optredende persoonlijke risico's bij verschillende activiteiten vertonen een statistisch stabiel gedrag over de jaren en zijn vergelijkbaar voor de westerse landen. Dit is een indicatie voor een stabiel patroon van preferenties. Afgezien van een kleine neerwaartse trend, die te danken is aan de technologische vooruitgang, is het persoonlijk risico consistent en stabiel. Het lijkt daarmee toelaatbaar er een richtlijn aan te ontleen voor beslissingen over het persoonlijk aanvaardbare risico.

Tabel 1: voorbeeld aanvaardbaar individueel risico

| kans | risico-omschrijving | voorbeeld |
|-----------|--|-------------------|
| 10^{-6} | onvrijwillig en weinig of indirecte baten | lpg-installatie |
| 10^{-5} | onvrijwillig en alleen indirecte baten | werken in fabriek |
| 10^{-4} | min of meer vrijwillig, redelijk directe baten | auto-rijden |
| 10^{-3} | vrijwillig | motorrijden |
| 10^{-2} | vrijwillig en grote persoonlijke baten | bergbeklimmen |

Door de introductie van het kosten en baten-aspect in het individueel risicocriterium, is het ook te verklaren dat het publiek, dat van de goede vliegverbindingen profiteert, een hoger risico aanvaardt van de luchthaven Schiphol (10^{-5} per jaar) dan van chemische installaties.

Het tweede gezichtspunt is dat van een maatschappij, die de vraag beschouwt of een activiteit aanvaardbaar is in termen van het risico dat het met zich meebrengt voor de gehele bevolking. Dit sociaal-politieke optimaliseringsproces is moeilijk expliciet te maken en wordt dan ook vaak op tastende wijze uitgevoerd. Het bevoegde gezag maakt keuzes en het verdere verloop van de gebeurtenissen toont aan hoe verantwoord die keuzes waren. In het algemeen wordt het risicobegrip in de maatschappelijke context gereduceerd tot het aantal doden of materiële schade. In hoeverre deze keuze verantwoord is in termen van ernstig en licht gewonden en van schade aan cultuur en milieu, is in toenemende mate de vraag. Als het gespecificeerde niveau van letsel wordt beperkt tot het verlies van leven, kan het maatschappelijk risico gemodelleerd worden door de overschrijdingskromme van het aantal doden, ook wel aangeduid als de FN-curve.

Het onderscheid tussen individueel en maatschappelijk standpunt ligt in de omvang van de groep van de bevolking die tegelijkertijd omkomt bij een ongeval.



De fietstunnel van de aanbouw zijnde 2e Heinenoordtunnel is een mooi voorbeeld van een hightech-situatie.

Voor stationaire installaties is op centraal politiek niveau een norm gedefinieerd, waarbij een aantal doden ineens op één enkele locatie aanvaardbaar wordt geacht, als de FN-curve een bepaalde grens niet overschrijdt; het aanvaardbare Groeps Risico (GR). Het hanteren van deze norm voor transportwegen behoeft aanpassing. Nu kan het risico dat wordt veroorzaakt door de transportweg, per woonkern worden afgebeeld door middel van een FN-curve. Aangezien dit voor een aantal lokaties langs vaarwegen leidt tot een overschrijding van het groepsrisico-criterium voor stationaire installaties, is zonder een degelijke theoretische onderbouwing een toepassing van het criterium per km (vaar)weglengte voorgesteld. Als eenheid voor de norm is dat een vrij arbitraire keuze.

Het groepsrisico-criterium van VROM is gericht op één enkele installatie en schenkt geen aandacht aan het totale risico op nationaal niveau, zowel wat mensenlevens als wat economische schade betreft. Het is echter duidelijk dat voortgaande onbeteugelde ontwikkelingen in het aantal installaties tot een merkbare verslechtering van de gehele veiligheidstoestand in het land kunnen leiden. Hiermee is voor een generiek risico-raamwerk een derde karakteristiek gevonden:

- De aanvaarding van het totale maatschappelijk risico (de sommatie van alle FN-curven van alle installaties) per activiteit vindt plaats op nationaal niveau. Uit deze nationale groepsrisiconorm dient vervolgens met inachtneming van het aantal installaties (woonkernen voor transportwegen, polders voor waterkeringen) de lokale groepsrisiconorm te worden afgeleid.

Volgens deze redenering is het groepsrisico van de ene nationale luchthaven Schiphol aanvaardbaar, hoewel zij het groepsrisico-criterium van VROM overschrijdt. Evenzo lijkt een toepassing bij het transportrisico van een lokale norm per woonkern op minder conceptuele moeilijkheden te stuiten dan de ad hoc-oplossing.

Deze filosofie, die rekening houdt met het economisch belang en het aantal installaties of te beschermen eenheden, is de risicobenadering die is ontwikkeld door de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. Deze benadering voegt aan de evaluatie van het maatschappelijk aanvaardbare risico een economische benadering toe. Dit laatste schept een band met de al genoemde filosofie die voor de Nederlandse dijken werd ontwikkeld door D. van Dantzig. Een beschouwingwijze die een formalisatie lijkt te zijn van het in de chemische industrie bekende ALARA-beginsel (**As Low As Reasonable Achievable or Possible**). Het zwaarste criterium in het drietal Individueel Risico, GroepsRisico en Economische Optimaal Risico wordt geacht maatgevend te zijn voor de toelaatbaarheid van de activiteit of de vormgeving ervan.

Belangrijk is ook de notie dat de nationale norm in een langere tijdsyclus aanpassing behoeft aan veranderende maatschappelijke perceptie en acceptatie. Het aanvaardbare risiconiveau dient regelmatig te worden beoordeeld in het licht van de ontwikkeling van het aantal installaties, de kosten en baten van de activiteit en de algemene trend in de veiligheid.

ONTWERP EN INNOVATIE Voor het ontwerpen van kunstwerken of artefacten betekent bovenstaande analyse dat de aandacht moet verschuiven van artefact naar proces. Het proces dient integraal met inachtnaam van alle kosten en baten optimaal te worden ontworpen. Tevens dient in een redelijk vroeg stadium met de methoden van de risicoanalyse te worden onderzocht hoe ongunstige afwijkingen mens, maatschappij, bezittingen en milieu kunnen schaden. Gezien de verschillende percepties van de te behalen baten, verdient het aanbeveling mensen in te delen in de categorieën: personeel, gebruiker en derde.

Bij de verdere optimalisatie van het ontwerp behoren de vijf lagen waarop de gevolgen van ongunstige afwijkingen kunnen worden bestreden (artefact, organisatie, lokatie of route, rampenbestrijding en hulpverlening) in samenhang te worden gezien. Helaas stuit zo'n aanpak soms op institutionele belemmeringen, aangezien verschillende organisaties zeggenschap hebben over en belang hebben bij de verschillende lagen. Een eerste hinderpaal is al dat de drie categorieën, mensen tot het beleidsterrein van verschillende ministeries gerekend worden (bij een transportproject bijvoorbeeld Sociale Zaken, Verkeer en Waterstaat en VROM).

Vaak is het ook zo dat machine en infrastructuur onder de verantwoordelijkheid van verschillende organisaties vallen. Vermeden moet worden dat bijvoorbeeld frequente kleine afwijkingen in de machine dwingen tot grote investeringen in de infrastructuur om de eventuele gevolgen te beperken, terwijl de oorzaak eenvoudiger en tegen geringere kosten kon worden aangepakt.

De ervaring binnen de Rijkswaterstaat leert dat sterk vernieuwende concepten ontwikkeld en gebouwd kunnen worden, als men erin slaagt de verschillende invalshoeken met de benodigde bevoegdheden te verenigen in een projectorganisatie. Europoort, de stormvloedkering in de Oosterschelde en de stormvloedkering in de Waterweg zijn daarvan voorbeelden.

DETERMINISME VERSUS PROBABILISME Bij de bepaling van veiligheidsmaatregelen maakt men gebruik van zowel deterministische als probabilistische methoden. Soms wordt de verwarring nog groter door het hanteren van ongevalsscenario's als een schijnbaar alternatief voor de twee genoemde methoden.

De probabilistische benadering is de enige kwantitatieve methode om onzekerheid in

de waarden van variabelen en gebeurtenissen met een kleine kans van voorkomen met daaraan verbonden onzekere gevolgen, te beschrijven.

De maximaal geloofwaardige stormvloedstand bij Hoek van Holland is volgens het Delta-rapport ongeveer NAP+7m. De vraag is of men hierop de hoogte van de dijken moet baseren. Uit de door Van Dantzig uitgevoerde afweging van de kosten en de baten, waarin de afnemende kans op de overschrijding van hogere stormvloedstanden is opgenomen, blijkt dat een ontwerppeil van NAP+5.85m economisch optimaal is.

Op eenzelfde manier dient men te onderzoeken of het economisch verantwoord is een rampenbestrijdingsorganisatie toe te rusten voor het maximaal geloofwaardige ongeval. De sleutel tot het antwoord is de kans dat dit ongeval of een groter optreedt.

De hoogwater-overschrijdingslijn en de FN-curve (de overschrijdingslijn van de omvang van de gevolgen in doden of materiële schade) zijn in de respectieve gevallen de ideale instrumenten om de onzekerheid te kwantificeren en voor rationele besluitvorming toegankelijk te maken.

Het scenariodenken is nauw verwant met de probabilistische methode. Waar de probabilistische methode het verloop van de gebeurtenissen door continue wiskundige functies tracht te beschrijven, wordt bij een scenariobenadering het continuüm ingedeeld in een betrekkelijk klein aantal stappen, met concrete waarden voor de variabele. Elke waarde vertegenwoordigt een scenario.

Zo kan men de hoogwateroverschrijdingslijn vervangen door drie waarden van de stormvloedstand (bijvoorbeeld NAP+3, +4 en +5m) teneinde voor die waarden het verloop van de ramp te beschrijven. Om tot een keuze te komen van de optimale dijkhoogte, moet men echter (impliciet of expliciet) aan elk scenario een kans toekennen. Vergeleken met de probabilistische methode pleegt men dan wel een benadering met een stap-grootte van 1 m, zodat het werkelijk optimum gemakkelijk gemist kan worden. Het grote voordeel is evenwel de betere toegankelijkheid voor leken. De in de inleiding genoemde matrix van de motie- De Muralt/Bongaerts is een voorbeeld van de scenariomethode.

Nadat de beslissing over de hoogte van de dijk of de omvang van de rampenbestrijdingsorganisatie is genomen, komt de uitvoering aan de orde. De stuur-variabelen hebben nu vaste waarden gekregen, die in de praktijk gerealiseerd moeten worden. Ogenscheinlijk is het kans-element nu verdwenen en is de deterministische benadering van toepassing. Voor een deel is dit echter schijn, want wanneer de ramp zal optreden en wat dan de omvang daarvan zal zijn, blijft onzeker.

Na de optimalisatie van het ontwerp met de vijf lagen waarop de gevolgen van ongunstige afwijkingen kunnen worden bestreden (artefact, organisatie, lokatie of route, rampenbestrijding en hulpverlening), vindt de realisering ervan plaats.

Vanaf dat moment zullen met name de organisaties in het geheel streven naar een bestendiging van hun eigen toekomst. Gezien de per definitie geringe bezettingsgraad van de hulporganisaties, kunnen zij zich ook aanbieden voor dezelfde taak in andere processen (bijvoorbeeld de brandweer). De kans is dan groot dat zij de optima van het ene proces deterministisch geldig zullen verklaren voor het andere, hoewel dat in het algemeen niet juist zal zijn. Bij andere kostenverhoudingen gelden immers andere optimale combinaties van middeleninzet.

Een ander probleem is dat perceptie en acceptatie van risico geen statische begrippen zijn, maar in de tijd aan verandering onderhevig door de maatschappelijke dynamiek. Normen en waarden veranderen, zoals bijvoorbeeld de groeiende zorg voor het milieu illustreert. Verder is er de door de welvaarts-groei gedreven voortdurende verhoging van de kosten van maninzet ten opzichte van de kosten van vaste activa. Hierdoor zullen de

optimale keuzen in de tijd verschuiven in de richting van de artefacten ten koste van maninzet en organisatie. Een tendens die niet zonder meer zal worden begrepen door hulporganisaties, die naar bestendinging streven vanuit een deterministische rolopvatting.

Een periodieke herbeschouwing van het gehele optimum zou de voorkeur verdienen, gevolgd door een beheerste verandering. Maar vaak zullen budgettaire problemen of een ernstig ongeval nodig zijn om een verandering in gang te zetten. Bepaalde voorheen aanvaarde gevaren zullen plotseling als ontoelaatbaar gezien worden en de rollen van actoren en hun institutionele verbanden moeten dan veranderen. Een terugtredende overheid, deregulering en privatisering leiden tot een snellere herordering in de richting van een optimalere inzet en hiërarchie van partijen.

Verantwoordelijkheden worden verplaatst naar lagere bestuurslagen en naar andere ministeries, waardoor probleemeigenaren verdwijnen en er nieuwe organisaties ontstaan, zoals recentelijk de slachtofferverenigingen in luchtvaart, scheepvaart en wegverkeer.

De twee benaderingen de probabilistische en de deterministische zijn complementair en zelfs iteratief. Zij zullen na elkaar moeten worden ingezet in het ontwerpen en tot stand brengen van het systeem.

TENSLLOTTE De Rijkswaterstaat staat voor de uitdaging om in samenwerking met de wetenschap een coherente veiligheidsfilosofie te ontwikkelen. Die filosofie zal op alle beleidsterreinen van Verkeer en Waterstaat toepasbaar moeten zijn. Zijn positie en ervaring als ontwerper, uitvoerder en beheerder van infrastructuur kan daarbij bijzonder stimulerend werken. Denk maar aan de sprongen voorwaarts die in het verleden zijn gemaakt in het kader van de grote projecten

Om de veiligheidsfilosofie in een optimaal ontwerp te assimileren, zal de ontwerpaandacht verbreed moeten worden van artefact naar proces. Daarin behoren, zoals uiteengezet, behalve de artefacten, ook de organisatie die nodig is voor het functioneren en de locatie of een route te zijn begrepen, evenals de rampbestrijding en hulpverlening om de gevolgen van mogelijk falen te kunnen beperken.

REFERENTIES

- P.J. Wemelsfelder, Wetmatigheden in het optreden van stormvloed, De Ingenieur no. 9, 1939
- A.H. Maslow, A Theory of Human Motivation, Psychological Review, July 1943
- J. van de Kreeke, J., A. Paape, On the optimum breakwater design, Proc. 9-th Int. Conf. Coastal Eng.
- D. van Dantzig, J. Kriens, Het economische beslissingsprobleem inzake de bescherming van Nederland tegen stormvloed, Rapport van de Delta Commissie, Deel 3, Sectie II.2, Den Haag, 1960.
- D. van Dantzig, Economic Decision Problems for Flood Prevention, Econometrica 24, pp 276-287, New Haven, 1956.
- Ministerie van VROM, Omgaan met risico's, Den Haag, 1992
- J.K. Vrijling et al., A framework for risk evaluation, Journ. of Hazardous Materials 43 (1995) p. 245-261
- P.J.M. Stallen, R. Geerts and J.K. Vrijling, Three conceptions of Quantified Societal Risk, Risk Analysis, Vol.16, no.5, 1996

DE BETROUWBAARHEID
VAN **DIJKEN**

Gaten in de analyse

A. Verruijt
18

• • •

In 1993 en 1995 schrok Nederland op van hoog water. Behalve dat dit leidde tot paniek en evacuaties, was het hoog water een goede gelegenheid om te evalueren of de stand van techniek en wetenschap spoorde met de praktijk. Zijn de methodes voor het beoordelen van de stabiliteit van een dijk wel voldoende en verantwoord? Nee, concludeert de schrijver van dit hoofdstuk. Er bestaan nog meerdere leemtes in de analyse. Maar meer nog stelt hij dat de wetenschap alleen niet bepalend mag zijn voor ingrijpende beslissingen als een evacuatie. Altijd zullen rekenmethodes moeten worden afgewogen tegen lokale kennis en ervaring.

• • •

Een van de belangrijkste taken van de Rijkswaterstaat is de zorg voor de veiligheid van het land tegen overstromingen. Op veel plaatsen in Nederland is die veiligheid niet zonder meer gewaarborgd, en zijn er dijken nodig om overstromingen tegen te gaan. De beoordeling van de betrouwbaarheid van die dijken is een belangrijke taak van de overheid, en Rijkswaterstaat speelt daarin een belangrijke rol, ook al is de eerst-verantwoordelijke instantie vaak een andere: het waterschap of de provincie. Het eerste basisprincipe van de dijkbouw is nogal simpel: de kruin van de dijk moet hoger zijn dan de hoogste te verwachten waterstand. En het is dus van het grootste belang de waterstanden te kunnen voorspellen, en ook om voldoende hoogte van de dijken te verzekeren. Maar ook als dat in orde is dreigen er nog allerlei gevaren, omdat ook een dijk die niet overstroomt kan bezwijken, doordat de sterkte van de grond onvoldoende is. Op een aantal van die grondmechanische risico's wordt hieronder ingegaan. Dat is een mooi voorbeeld van de combinatie van wetenschap, kennis, kunde, ervaring en intuïtie.

Nu in de afgelopen jaren, in 1993 en 1995, in de Nederlandse rivieren het water zo hoog geweest is dat op diverse plaatsen een kritieke toestand is ontstaan, is het goed om eens te evalueren of de stand van de techniek en van de wetenschap wel overeenkomt met de praktijk. Daartoe zal vooral aandacht besteed worden aan de stabiliteit van het dijklichaam, en zal worden nagegaan of de gebruikelijke methodes voor de beoordeling van de veiligheid van een dijk verantwoord zijn.

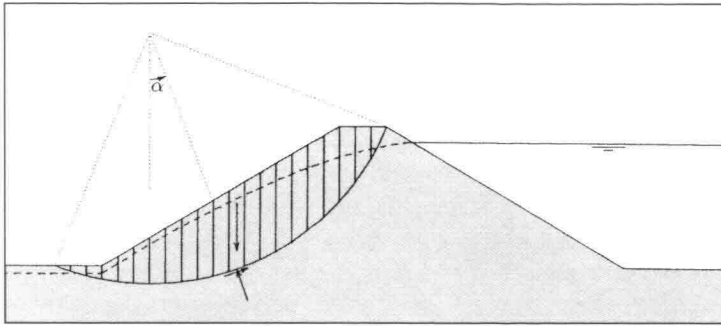
De mens kijkt bij hoog water niet werkeloos toe, hij vlucht, maar probeert ook het bezwijken van de dijk te voorkomen.



Hoogwater in de Waal bij Neerijnen in 1993.

DE STABILITEIT VAN HET EVENWICHT De analyse van de vervormingen van een grondlichaam behoort tot het vakgebied van de grondmechanica. In dat vakgebied spelen, zoals in alle gebieden van de mechanica van continua, drie basisprincipes een rol. In de eerste plaats is dat het evenwicht van het krachtenveld, in de tweede plaats de continuïteit van het veld van verplaatsingen, en in de derde plaats het verband tussen spanningen en vervormingen. Dat laatste is in de grondmechanica het moeilijkste onderdeel, omdat er zoveel factoren van invloed zijn. Vooral vervelend is dat het gedrag van grond afhangt van de geschiedenis die het heeft doorgemaakt. Aan een berg grond kun je niet afzien of er vroeger misschien een pakket ijs op gelegen heeft, en ook niet of men het na het storten misschien nog verdicht heeft met trilnaalden. En omdat er geen gedetailleerde beschrijvingen bestaan van de precieze manier waarop een grondlichaam zoals een dijk is ontstaan, moet men de eigenschappen van het materiaal ofwel in het terrein meten, ofwel schatten. Daarbij spelen allerlei onzekerheden een rol, en het ligt voor de hand om te verwachten dat men daarom maar aan de veilige kant gaat zitten.

DE BEREKENINGSMETHODE De gebruikelijke manier om de stabiliteit van een dijk te beoordelen is om een berekening te maken van de veiligheidsfactor tegen afschuiven van een cirkelvormig glijvlak, zie figuur 1. Deze methode bestaat er uit dat men voor



FIGUUR 1: Glijvlakberekening.

een groot aantal cirkels berekent hoe groot de verhouding is tussen het moment van de maximale weerstand tegen afschuiven (geleverd door schuifspanningen langs de glijcirkel) en het moment van het gewicht van de afschuivende moot grond, alles ten opzichte van het middelpunt van de aangenomen cirkel. Men noemt die verhouding van sterkte en belasting de **veiligheidscoëfficiënt**, zoals algemeen gebruikelijk. De laagste veiligheidscoëfficiënt is uiteraard maatgevend, en de door Rijkswaterstaat gehanteerde minimale waarde is ongeveer 1.3 voor nieuw aangelegde dijken, en 1.2 voor al lang bestaande dijken.

De berekening van de veiligheidscoëfficiënt geschiedt meestal door de moot grond in een groot aantal kleine lamellen te verdelen, en dan de verhouding tussen sterkte en belasting te bepalen. De gebruikte formule is

$$F = \frac{\sum (c + \sigma'_n \tan \phi) / \cos \alpha}{\sum \gamma h \sin \alpha} \quad [1]$$

In de teller van deze breuk staat het moment van de maximaal mogelijke schuifspanningen, dat des te groter is naarmate de sterkte van de grond, zoals uitgedrukt door de cohesie c en de wrijvingshoek ϕ , groter is. De noemer is het moment van het gewicht van alle lamellen, dat groter is naarmate de hoogte h van de lamellen, of het gewicht γ groter is. De grootte σ'_n is de normaalspanning langs het glijvlak, die nog aparte berekening vereist. De grootte $\sin \alpha$ drukt uit hoe groot de arm van de kracht is. Voor lamellen links van het middelpunt van de cirkel is α negatief. Die lamellen maken het moment van de belasting kleiner, en die werken dus gunstig.

De wetenschappelijke onderbouwing van de rekenmethode met cirkelvormige glijvlakken is nogal slecht. Zo is het bijvoorbeeld niet ondenkbaar dat de dijk bezwijkt door een ander mechanisme, met afglijden langs een anders gevormd glijvlak, of door interne erosie van de grond, of door gangen gravende muskusratten. Maar ook bevat de uitwerking van de berekening, en de bepaling van de maatgevende parameters, nogal wat onzekerheden en benaderingen. Een voorbeeld van die onzekerheid is de onbepaaldheid van de horizontale spanningen in de grond. Een ander voorbeeld is de invloed van de spanningen en vervormingen in de lengterichting van de dijk. En de berekeningsmethode bevat, als men in detail gaat kijken, ook nog een aantal vereenvoudigende aannamen (bijvoorbeeld over de krachten tussen de lamellen). Al die beperkingen betekenen dat er nog veel te studeren en veel te onderzoeken valt. Hier wordt er van uitgegaan dat de hierboven gegeven formule vooralsnog het beste is wat beschikbaar is. Ook wordt hier alleen het bezwijkmechanisme van afschuiven langs een glijvlak

beschouwd. Bezwijkmechanismen als interne erosie (piping), erosie van het buitentalud, of van het binnentalud bij golfoverslag, worden buiten beschouwing gelaten.

DE VEILIGHEID Dat bij hoog water de veiligheid afneemt, zoals men intuïtief aanvoelt, volgt eenvoudig uit de hierboven gegeven formule [1]. Als het water in de dijk hoger komt te staan wordt de factor γh , dat is het gewicht van een kolom grond, groter, en wel juist bij lamellen aan de kant waar $\sin \alpha$ positief is, en relatief groot. De waarde van de noemer wordt dus groter, en de veiligheid kleiner. Bovendien zorgt de toename van de waterspanningen er voor dat de korrelspanningen langs het glijvlak afnemen, en de teller wordt dus kleiner. Ook dat verlaagt de veiligheid. Bij hoog water in een rivier houdt het hoge water meestal gedurende verschillende dagen aan. Er is dan voldoende tijd voor het water om de dijk behoorlijk te vullen met water, en de veiligheid neemt daarom steeds verder af.

Zelfs als de dijk is opgebouwd uit heel slecht doorlatend materiaal (klei) zal bij hoog water de sterkte afnemen. Men mag er van uitgaan dat de grond in een kleidijk behoorlijk verzadigd zal zijn met water, als gevolg van regenval, en dat de grondwaterspiegel in de dijk behoorlijk hoog zal zijn. Wel is het goed mogelijk dat er in dat water capillaire spanningen optreden, met een freatisch vlak dat veel lager ligt dan de grondwaterspiegel. Die negatieve waterspanningen zijn gunstig voor de stabiliteit van de dijk, omdat ze de korrelspanningen vergroten. Maar bij hoog water in de rivier hoeft er maar heel weinig water de dijk in te stromen om de waterdrukken in de capillaire zone snel te laten oplopen. Dan nemen de korrelspanningen direct af, en daarmee de sterkte.

EXTRA VEILIGHEID Op zichzelf is het al merkwaardig dat voor dijken, die toch zo'n belangrijke rol spelen in de veiligheid van het land, zulke lage veiligheidscoëfficiënten worden gehanteerd. Bij gebouwen, die natuurlijk ook niet in moeten storten,

Zolang het water niet over de dijk dreigt te komen, is het ophogen van de kruin niet verstandig.



Noodreparaties aan de dijk bij Ochten tijdens extreem hoog water in de Waal in 1995.

maar wier eventuele bezwijken toch minder gevolgschade met zich meebrengt dan het bezwijken van een dijk, is de minimaal toelaatbare veiligheid 1.5. Blijkbaar spelen hier, bewust of onbewust, nog andere factoren een rol. Een daarvan is de overweging dat veel dijken in de loop der geschiedenis geleidelijk zijn opgebouwd, met een steeds toenemende hoogte. Die aanpassingen van de dijkhoogte zijn meestal gebeurd nadat bij hoog water het water over de dijk stroomde, of bijna. De nu nog bestaande dijken hebben die oude belasting zonder echt bezwijken doorstaan, en het is dus niet onredelijk om er rekening mee te houden dat ze een hoge belasting kunnen weerstaan. Men spreekt in dit verband thans over het begrip **bewezen sterkte**, en probeert dat in te bouwen in meer geavanceerde berekeningsmethoden.

Ook is het mogelijk dat er een verborgen veiligheid zit in de bepaling van de sterkteparameters van de grond. Het materiaal in de ondergrond is vaak nogal verschillend van samenstelling, en men vindt bij proeven in het laboratorium dan ook meestal een behoorlijke spreiding in de meetresultaten, die veel groter is dan bij de bepaling van de sterkte van staal of beton. Om het risico van bezwijken te vermijden neemt men uiteraard een karakteristieke waarde die aan de lage kant is, bijvoorbeeld de laagste waarde uit de serie proeven, of, als er veel onderzoek is gedaan, een statistisch verantwoorde waarde, zoals het gemiddelde min een zekere factor (bijvoorbeeld 2) maal de standaardafwijking. Een moeilijkheid daarbij is nog dat de grond in het algemeen opgebouwd is uit lagen van verschillend materiaal, en er dus zowel deterministische als statistische variaties zijn. Een enkele erg lage waarde kan dus veroorzaakt worden door een dun laagje slappe grond, of door een grote statistische variatie. Dat adviseurs en ontwerpers daarbij aan de veilige kant blijven is wellicht goed verklaarbaar. Wel moet worden opgemerkt dat grondmechanische adviseurs in eerste instantie de neiging hebben om verschillen in grondeigenschappen te verklaren als een gevolg van de laagopbouw van de grond. Dat leidt er toe dat een verzameling proefresultaten van ongeveer gelijke waarden en een enkele lage waarde al gauw geïnterpreteerd zal worden als een gevolg van een dun laagje in een verder homogeen pakket grond, en niet als een pakket grond met grote statistische variaties, en dus een redelijke kans op een lage gemiddelde waarde. Die interpretatie als een enkel dun laagje is in de berekening veel minder ongunstig als de interpretatie dat er een behoorlijke kans is op een lage gemiddelde sterkte, en de traditioneel werkende ingenieur maakt in dit geval dus een minder conservatieve analyse dan de moderne ingenieur met zijn probabilistische interpretatie.

Er is nog een ander effect dat moeilijk in de berekening kan worden ingebracht, en dat een zekere verborgen veiligheid inhoudt. Dat is dat bezwijken van een dijk op een bepaalde plaats alleen maar kan optreden als langs het gehele glijvlak de maximale schuifspanning wordt overschreden. Voor het geval van een dergelijke serie-schakeling van elementen is volgens de theorie van de statistiek de te verwachten gemiddelde waarde gelijk aan het gemiddelde van de lokale waarden, maar is de standaardafwijking gelijk aan de standaardafwijking van de lokale waarden gedeeld door \sqrt{N} , waarin N het aantal elementen is. De gemiddelde sterkte van N elementen varieert dus veel minder sterk dan die van een enkel element. Men kan het vergelijken met de lengte van een groep studenten. De kans dat de lengte van een enkele student groter is dan 2 meter is redelijk groot. Maar de kans dat van een groep van 10 studenten de gemiddelde lengte groter is dan 2 meter is veel kleiner (tenzij men de steekproef neemt uit volleyballers). De kans dat de gemiddelde sterkte van een laag grond erg laag is, is veel kleiner dan de kans dat een enkel monster een lage sterkte heeft. Om dit soort overwegingen in een berekening te brengen is de wetenschap van de grondmechanica nog

niet ver genoeg ontwikkeld. In het voorbeeld hierboven is het namelijk niet duidelijk uit hoeveel elementen (N) een glijvlak precies bestaat. En bij een goed rekenmodel hoort het niet uit te maken in hoeveel stukjes men het grondlichaam voor de berekening opdeelt. Logischerwijs zou men moeten mogen stellen dat N heel groot is, en voor $N \rightarrow \infty$ wordt de standaardafwijking nul, hetgeen betekent dat men met het gemiddelde van de materiaaleigenschappen zou mogen rekenen, zonder standaardafwijking. Dat durven de meeste ingenieurs nog niet aan.

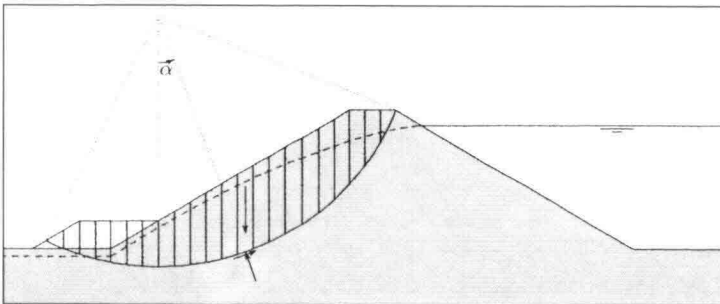
MENSELIJK INGRIJPEN

De gebruikelijke benadering van de analyse van het bezwijken van constructies, en ook van dijken, gaat uit van een zeker bezwijkmechanisme, en probeert dat zo goed mogelijk te beschrijven. Vaak worden daarbij dan ongunstige aannamen gedaan over bepaalde omstandigheden. Zo wordt bij dijken aangenomen dat het grondwater in de dijk zich aanpast aan een hoge rivierwaterstand. Dat lijkt alleszins redelijk, omdat het hoge water meestal wel enige dagen aanhoudt, en het water dus voldoende tijd heeft om de dijk te vullen. Bovendien is de totale lengte van de dijken langs een rivier zeer groot, en de dijk hoeft maar op een plaats door te breken om een overstroming van de polder te veroorzaken. Omdat er langs zo'n lange dijk altijd wel een plek zal zijn waar de doorlatendheid van de grond toevallig nogal wat groter is dan gemiddeld (door zandinsluitingen, of door scheuren), ligt het voor de hand er van uit te gaan dat de grondwaterstand ergens langs de dijk na enige tijd wel hoog zal zijn, en dat is voor de stabiliteit ongunstig.

In deze benadering gaat men er eigenlijk ook van uit dat de mens bij hoog water werkeloos toekijkt, eventueel met grote interesse (vooral de wetenschappers, die nu wel eens willen zien of de theorie klopt), maar zonder in te grijpen. In de werkelijkheid is dat niet het geval. Niet alleen vluchten sommige mensen, en beperken zo het risico, maar anderen proberen het bezwijken van de dijk te voorkomen. Met man en macht wordt geprobeerd de dijk te versterken, en de ongunstige effecten tegen te gaan. Bij recente hoge waterstanden in rivieren in Nederland en in andere landen (USA, Duitsland, Polen) heeft men kunnen zien dat er verschillende maatregelen worden genomen om bezwijken van de dijken tegen te gaan. Het is interessant om het nut van een aantal maatregelen te illustreren. Daarbij zal blijken dat er een goede wetenschappelijk verantwoorde onderbouwing van elk van die maatregelen is te geven.

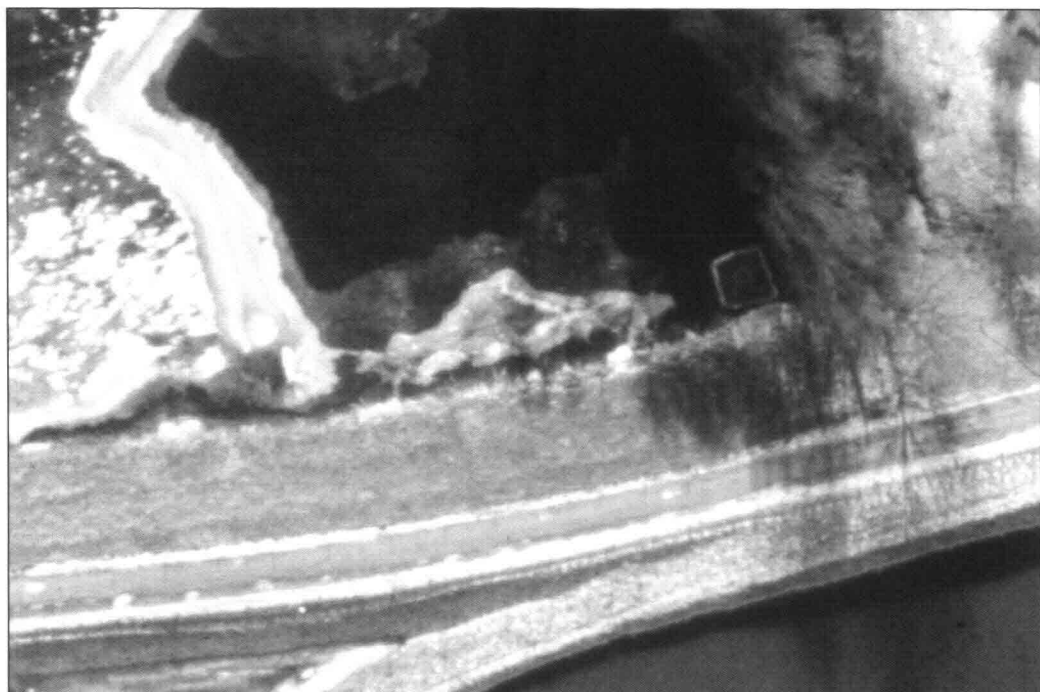
ZANDZAKKEN OP DE DIJK

De meest simpele manier om overstroming van een dijk tegen te gaan als het water over de kruin van de dijk dreigt te stromen, is om de



FIGUUR 2: Zandzakken op het binnentalud.

Het is merkwaardig dat voor dijken zulke lage veiligheidscoëfficiënten worden gehanteerd.



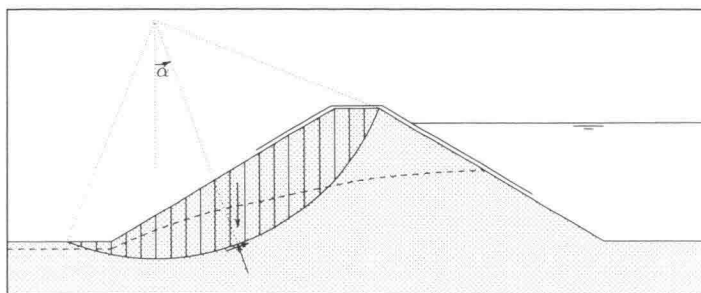
De IJsseldijk ter hoogte van de Bahrsepol met achter de dijk een typisch voorbeeld van een opgekiste wel.

dijk te verhogen, bijvoorbeeld met zandzakken. In 1953 hebben de Muralt-muurtjes in Zeeland op sommige plaatsen overstroming voorkomen (al ging het dan toch mis, omdat elders de dijken doorbraken), op veel plaatsen in Nederland heeft men in 1993 en 1995 met succes in korte tijd een dijke opgeworpen of verhoogd, en zo overstrooming van de dijk tegengegaan. Vooral op diverse plekken langs de Maas, waar men niet zo op hoog water had gerekend, is hierdoor veel schade voorkomen.

Als het water niet zo hoog komt dat overstroming optreedt, maar wel zo hoog dat er stabiliteitsverlies van de dijk te vrezan valt doordat het water in de dijk treedt, en er doorheen stroomt, kan men de stabiliteit van de dijk vergroten door aan de benedenstroomse zijde extra gewicht aan te brengen. Dat gaat relatief snel en gemakkelijk door het aanbrengen van een ophoging met los zand, of met zandzakken, zie figuur 2. Dat dit inderdaad de veiligheid vergroot kan men eenvoudig inzien aan de hand van de basis-formule (1). Het gewicht van de lamellen aan de onderkant van het talud, waar $\alpha < 0$, wordt vergroot, en de noemer van de breuk wordt dus kleiner. Bovendien wordt de korrelspanning daar ter plaatse ook nog vergroot, en de teller wordt dus groter. Dat laatste is wel iets minder zeker, omdat een deel van het gewicht van de zandzakken misschien opgenomen wordt door waterspanningen, vooral in het geval van een kleidijk, maar het helpt in elk geval wel. Het belangrijkste effect is echter het eerstgenoemde effect, dat door het gewicht van het zand het aandrijvende moment van de belasting kleiner wordt.

Om een soortgelijke reden verbiedt een burgemeester of een dijkgraaf bij hoog water vaak het verkeer over de kruin van een dijk. Een dergelijke extra belasting werkt voor het aandrijvend moment ongunstig, omdat in de term $\gamma h \sin \alpha$ in de noemer van de formule [1] de factor $\tan \alpha$ nu positief is, en zelfs vrij groot, omdat α daar relatief groot

Uit wetenschappelijk oogpunt is het jammer dat de natuur niet de kans heeft gekregen de ramp in volle omvang te laten geschieden.



FIGUUR 3: Vliezen op het buitentalud.

is. Blijkbaar leeft het begrip van het bezwijkmechanisme niet alleen bij wetenschappers en technici, maar ook bij de bestuurders. Eigenlijk werken zandzakken boven op de dijk voor dit bezwijkmechanisme ook negatief. Maar die moeten dan ook een nog groter gevaar weerstaan: het direct overstroom van de dijk. Wel zou men mogen bedenken dat zolang het water niet over de dijk dreigt te komen het ophogen van de kruin niet verstandig is.

PLASTIC VLIEZEN OP HET BUITENTALUD Een andere mogelijkheid om het bezwijken van een dijk tegen te gaan is het aanbrengen van plastic vliezen op het buitentalud van een dijk, zie figuur 3. De bedoeling hiervan is om het indringen van water in het dijklichaam tegen te gaan. Als dat inderdaad lukt kan men het oplopen van de waterdrukken in de dijk vertragen, en dat werkt gunstig. Enerzijds wordt het aandrijvend moment iets minder groot, en de noemer in de formule [1] wordt dus kleiner, anderzijds blijven de korrelspanningen op het glijvlak hoger, en de teller wordt dus groter. In totaal is de veiligheidscoëfficiënt groter dan in het geval zonder vliezen. De vliezen moeten wel goed aansluiten, en behoorlijk ver naar beneden doorlopen, zodat ze een behoorlijke afsluitende werking hebben. Men kan zijn twijfels hebben over de effectiviteit van deze techniek, maar ze werkt zeker positief, en versterkt ook het vertrouwen dat men er alles aan gedaan heeft om bezwijken van de dijk tegen te gaan.

ERVARINGEN Hoewel er hierboven wel veel kritiek en commentaar op de methode van beoordeling van de stabiliteit van een dijklichaam gegeven is, is er geen aanleiding om de toepasbaarheid van het principe van de methode in twijfel te trekken. De hoge waterstanden in de Nederlandse rivieren in de winters van 1993 en 1995 hebben de gelegenheid geboden om de methodiek te evalueren. Daarbij is het misschien uit wetenschappelijk oogpunt jammer dat bij een aantal kritieke situaties (kritiek volgens de plaatstelijke bevolking, en volgens de betrokken deskundigen) de natuur niet helemaal de gelegenheid heeft gekregen de ramp in volle omvang te laten geschieden, maar dat ingenieurs en bevolking gezamenlijk noodmaatregelen hebben genomen, en een ramp hebben weten te voorkomen. Daar kan niemand bezwaar tegen maken, hoewel men nu de ervaring van een situatie met een veiligheidscoëfficiënt kleiner dan 1 net mist. Overigens zijn er voldoende experimentele resultaten van laboratoriumproeven, en van proeven op ware grootte, om de betrouwbaarheid van de rekenmethodes te bevestigen.

Bij extreem hoog water kan er een ogenblik komen dat de autoriteiten moeten besluiten tot noodmaatregelen als evacuatie. In 1995 is dat moment ook inderdaad opgetre-

den, en is in Gelderland een groot gebied geëvacueerd. Daarbij hebben bestuur, techniek, wetenschap en ervaring elk een rol gespeeld. Van groot belang daarbij was dat er in 1993 ook een zeer hoge waterstand was opgetreden, en dat daarbij wel op diverse plaatsen een kritieke toestand was ontstaan, met veel kwelwater door de dijk, of grote wellen achter de dijk. Ook toen was het op diverse plaatsen nodig om met zandzakken extra tegendruk aan te brengen. Achteraf zijn een aantal van die kritieke plaatsen nog eens in detail doorgerekend, en daarbij bleek dat de veiligheidscoëfficiënten nog maar net boven de kritieke waarde 1 waren gebleven. Toen dan ook in 1995 bleek dat het water nog hoger kwam dan in 1993 was te verwachten dat de veiligheid nog lager zou worden. Toen dan ook de voorspellende berekeningen van de dijkbeheerders en hun adviseurs aangaven dat op diverse plaatsen de veiligheid ernstig in gevaar kwam, is de aanbeveling gedaan om tot evacuatie over te gaan. In de daarop volgende dagen bleek de toestand van de dijken in Gelderland inderdaad uiterst kritiek te zijn. Op veel plaatsen ontstonden zandmeevoerende wellen, er kwam op veel plaatsen aan het binnentalud veel water uit de dijk (een teken van verzadiging van de dijk met water), en er ontstonden hier en daar zelfs langsscheuren in de kruin van de dijk, een waarschuwingssignaal voor een begin van afschuiving. Op die verontrustende signalen is door de dijkbeheerders gereageerd met diverse noodmaatregelen, zoals hierboven beschreven, om te proberen de dijken te behouden. Op sommige plaatsen is de binnenzijde verzawaard, of is de indringing van water aan de buitenzijde belemmerd met plastic vliezen.

Een van de lessen uit het hoge water van 1995 is dat het niet alleen de wetenschap is die bepalend moet zijn voor zulke ingrijpende beslissingen als al dan niet evacueren van een bedreigd gebied. Zo is bijvoorbeeld in Noord-Brabant in het gebied bij Woudenberg niet tot evacuatie besloten, terwijl de eerste glijvlakberekeningen wel degelijk leidden tot veiligheidscoëfficiënten kleiner dan 1. Inspectie van de dijk door technici met verschillende achtergrond gaf aan dat er, ondanks het inmiddels ontstane hoge water, nergens een teken was van uit of door de dijk stromend water. Bovendien gaf visuele inspectie de indruk dat nergens in de dijk de stijfheid erg laag was door hoge waterspanningen en de daarbij behorende lage korrelspanningen. Daarom is voor dat geval maar gesteld dat de sterkteparameters van de grond in de berekeningen te laag waren aangenomen, en dat de ongunstige combinatie van omstandigheden zoals in de berekeningen was aangenomen, te ongunstig was. Daarom is gesteld dat de situatie aldaar niet dermate kritiek was dat tot evacuatie zou moeten worden overgegaan. Tezamen met de op ervaring berustende indrukken van de plaatselijke bestuurders is daarom door het provinciebestuur de beslissing genomen het betreffende gebied niet te evacueren.

TENSLOTTE Concluderend kan worden gesteld dat er nog diverse wetenschappelijke leemtes zijn in de analyse van de stabiliteit van dijken. Deze rechtvaardigen nog diverse studies, zowel op het gebied van de ontwikkeling van de theorie als op dat van de uitvoering en de interpretatie van proeven in het laboratorium of in situ. Daarbij zal er steeds een spanningsveld blijven tussen de ontwikkeling van steeds geavanceerder rekenmethoden en de dagelijkse en lokale praktijk van de waterkering. Het werk van de Rijkswaterstaat op het gebied van dijken zal nimmer klaar zijn.

Voor de praktijk wordt geconcludeerd dat verantwoorde beslissingen over ingrijpende besluiten zoals over de evacuatie van een polder genomen kunnen worden als de conclusies onderbouwd kunnen worden door wetenschap, techniek en de lokale kennis en ervaring.

WINDGOLVEN

EEN FASCINEREND FENOMEEN

Hoe wetenschappelijke nieuwsgierigheid
leidt tot praktische toepassing

19
L.H. Holthuisen
J.A. Battjes

• • •

Windgolven voor de kust konden tot halverwege de jaren '80 niet erg nauwkeurig worden berekend. De kennis was ontoereikend en de computercapaciteit te gering.

Door samenspel tussen Rijkswaterstaat en de TU Delft ontstond een model dat golfvelden voor de kust net zo gedetailleerd en betrouwbaar uitrekent als die op volle zee. Dit HISWA-model (**H**indcasting **S**hallow **W**ater **W**aves) werd wereldwijd de standaard. Daarna kwam Simulating Waves Nearshore (SWAN), een nog perfecter, nog geavanceerder model. Ook dat oogste alom enthousiasme. Maar in Delft is men nog niet tevreden. Er wordt alweer gewerkt aan nieuwe verbeteringen.

• • •

In zware stormen zijn zeegolven langs onze kust een bedreiging voor stranden, dijken en duinen. Maar ze zijn ook belangrijk voor dagelijkse omstandigheden waarin mensen veilig moeten kunnen werken, of waarin constructies goed moeten kunnen functioneren (bijvoorbeeld in de offshore-industrie of de zeevaart). Verder vormen golven een fascinerend schouwspel dat de nieuwsgierigheid van mensen prikkelt. Om al deze redenen zijn golven onderwerp van studie in de vakgroep Waterbouwkunde van de TU Delft.

Windgolven worden overwegend opgewekt in zeeën en oceanen, maar voor Rijkswaterstaatstoepassingen is vooral hun voorkomen in de kustzones van belang. Het berekenen van golven op de diepe oceaan en in randzeeën wordt traditioneel gedaan door meteorologische en oceanografische instituten zoals het KNMI. Voor de kustzones gebeurt dit vooral door ingenieurs in overheidsdiensten, zoals Rijkswaterstaat, ingenieursbureaus en het Waterloopkundig Laboratorium.

Deze berekeningen zijn van groot belang voor het ontwerpen van de Nederlandse kustverdediging. Hoe hoog de Hondsbossche Zeewering moet zijn of hoe sterk de stormvloedkering in de Oosterschelde, hangt direct af van golfberekeningen. Dit heeft vooral betrekking op extreme situaties die hopelijk nooit zullen worden waargenomen, maar waartegen de dijken wel bestand moeten zijn. Een tegenstelling vormt het langzaam afkalven of aangroeien van stranden. Dat wordt bepaald door een groot aantal minder extreme situaties. De golfgegevens die hiervoor nodig zijn, zijn in principe door metingen te verkrijgen maar dan zou de hele kust bezaaid moeten worden met golfmeet-

In feite was het een verrassend eenvoudige oplossing voor een probleem dat vele jaren werk heeft gekost.



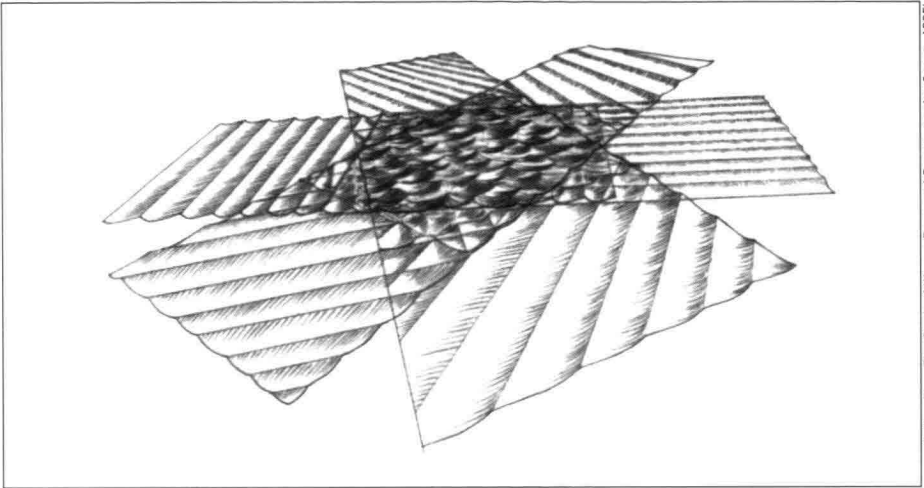
FIGUUR 1: Zeegolven bij Waimea Beach, Hawaii.

boeien. Dat is onrealistisch, zodat ook hier de toevlucht wordt genomen tot berekeningen. Meestal betekent dit dat diep-watergolfgegevens moeten worden 'vertaald' naar een groot aantal - locaties langs de kust. Tot halverwege de jaren tachtig werden daarvoor relatief eenvoudige modellen gebruikt. Voor een deel ontbrak de fundamentele kennis en de computercapaciteit die de ingenieurs tot hun beschikking hadden, was te klein (meestal veel kleiner dan de rekencapaciteit van de meteorologen). Er werd zo dus eigenlijk geen recht gedaan aan het complexe spel van wind, golven en stroming nabij de kust. Het gevolg was dat de golven niet erg betrouwbaar geschat konden worden en dat de ingenieurs daarom in hun ontwerpen extra (dure) veiligheidsfactoren moesten inbouwen.

Tien tot vijftien jaar geleden kwam er verandering in deze relatief primitieve situatie. De werelden van oceanografen en meteorologen aan de ene kant en ingenieurs aan de andere kant kwamen toen bijeen om de meer fundamentele problemen gezamenlijk aan te pakken. Bovendien maakte de stormachtige technologische ontwikkeling van computers het mogelijk dat óók de ingenieurs de beschikking kregen over een redelijke computercapaciteit.

Deze combinatie van kennisoverdracht en computercapaciteit, aangevuld met fundamenteel onderzoek, heeft ervoor gezorgd dat golven voor kustgebieden nu met ongeveer eenzelfde mate van detail en betrouwbaarheid kunnen worden berekend als voor open zee. De hoofdlijnen van deze ontwikkeling en het samenspel daarin tussen Rijkswaterstaat en de TU Delft, worden hier kort uiteengezet.

LICHTSTRALEN Om golfvelden voor de kust uit te rekenen, wordt vrijwel altijd uitgegaan van de golfcondities in diep water. Meestal wordt de grens hiervoor gesteld op 20 tot 25 meter waterdiepte op ongeveer 25 km uit de kust. In dieper water zijn de effecten van de bodem beperkt. In feite is er alleen sprake van een gering effect op de golfrichting (refractie, hetzelfde verschijnsel als het breken van lichtstralen) en een zwakke demping door bodemwrijving. Deze effecten zijn op dieper water goed te bepalen door enige aanpassingen aan de al langer bestaande oceaangolfmodellen. Maar als het water ondieper wordt, gebeurt er meer met de golven. In de eerste plaats worden



© Don King. The Book of Waves. Form and Beauty on the Ocean. ARPEL GRAPHICS, INC., Santa Barbara, Calif. 93101, USA

FIGUUR 2: Het onregelmatige golfoppervlak van de zee kan worden opgevat als een superpositie van zeer veel verschillende harmonische golfcomponenten, ieder met een eigen frequentie, golflengte, richting, fase en amplitude. De fase wordt vrijwel altijd genegeerd in de beschrijving van zeegolven (wordt verondersteld volkomen willekeurig te zijn). De golflengte en frequentie zijn in elkaar uit te drukken; het is daarom voldoende de amplitude (golfenergie) te kennen als functie van frequentie en richting (het twee-dimensionale golfenergiespectrum).

de effecten van refractie en bodemwrijving sterker, in de tweede plaats worden andere fysische effecten belangrijk, met name golfbreken en de onderlinge beïnvloeding van de golven. In het begin van de jaren '80 was hier wel iets van bekend, maar niet in voldoende detail om in de oceaanmodellen te kunnen worden toegepast. Bovendien vereisten die modellen teveel capaciteit.

Vroeger (en soms ook nu nog) werden de golven voorgesteld als een eenvoudige, regelmatige sinusvormige golf met oneindig lange golfkammen. Dat is natuurlijk een vergaande abstractie van de werkelijke, chaotische, kortkammige golven die we op zee zien. Maar de gebrekkige kennis en capaciteit dwongen nu eenmaal tot deze vereenvoudiging. Met behulp van simpele refractieberekeningen (in feite een veralgemenisering van de Wet van Snellius) werden de golfcondities nabij de kust geschat. Deze schattingen waren om twee redenen tamelijk slecht. Ten eerste omdat de golfkammen in de berekeningen als het ware in stukken uiteen vielen, waardoor de resultaten te grote ruimtelijke variaties vertoonden. Ten tweede werden de processen van golfgroei (door wind) en afname (door breken) slechts zeer ten dele weergegeven.

OOSTERSCHELDEPROBLEMATIEK De tekortkomingen van de traditionele technieken kwamen genadeloos aan het licht bij het ontwerp van de stormvloedkering in de Oosterschelde. Met de conventionele rekenmethoden konden geen realistische resultaten voor de golfindringing in de monding en de golfaanval op de kering worden verkregen. In het Oosterscheldebekken waren de lokale opwekking van golven, de invloeden van (tegen)stroom en het breken op de platen van belang, in verband met de te verwachten morfologische ontwikkelingen. Ook hiervoor waren de bestaande modellen niet toereikend.

In de jaren '70 en '80 was in de vakgroep Waterbouwkunde van de TU Delft fundamenteel onderzoek verricht naar een aantal fysische processen van golfvoortplanting en breking in ondiep water. Een rode draad in dit onderzoek, dat zich internationaal van

vele andere onderscheidde, is dat het onregelmatige karakter van de windgolven **ab initio** werd verdisconteerd, in plaats van uit te gaan van regelmatige golven, en de resultaten daarvoor post hoc op een enigszins willekeurige manier met een zogeheten equivalente golfhoogte en -periode te vertalen naar de realiteit.

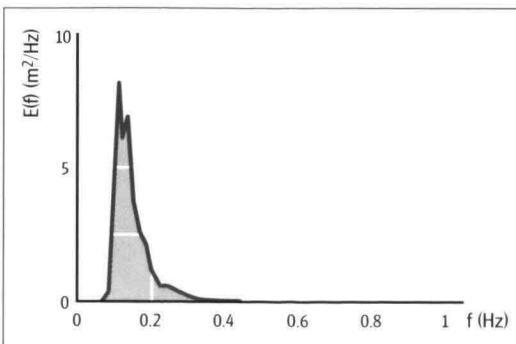
In de tijd van de Oosterscheldeproblematiek lagen de resultaten van deze onderzoeken klaar om operationeel te worden gemaakt. De vraag naar de ontwikkeling van een haantbaar en voor de Oosterscheldeproblematiek doelmatig model werd daarom door de ingenieurs van Rijkswaterstaat bij de TU Delft neergelegd. Het computermodel dat onder dit contract werd ontwikkeld, HISWA, is inmiddels wereldwijd het standaardmodel geworden in de kustwaterbouwkunde, en heeft ook de basis gelegd voor verdere ontwikkelingen. De structuur van het HISWA-golfmodel voor ondiep water is gebaseerd op die van golfmodellen voor diep water (oceaan).

OCEAANGOLFMODELLEN

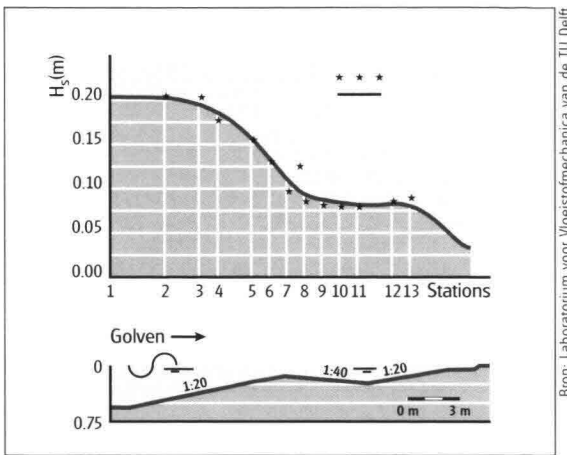
Het modelleren van onregelmatige golven op zeeën en oceanen berust op een zogenaamde spectrale beschrijving. De chaotische, kortkammige golven in een gebied van bijvoorbeeld honderd golflengten in het vierkant worden opgevat als een superpositie van zeer veel langkammige, harmonische componentgolven (sinusgolven), ieder met een eigen amplitude, frequentie en richting. Denk maar aan een verzameling wasborden die op elkaar geperst worden (figuur 2). Alle frequenties en richtingen zijn vertegenwoordigd, maar sommige frequenties en richtingen dragen meer energie (hebben een grotere amplitude) dan andere. Deze energieverdeling wordt beschreven door het spectrum. (figuur 3)

In de oceaangolfmodellen wordt de oceaan verdeeld in vakken waarin ook alle (in de praktijk enige honderden) componenten met verschillende richtingen en frequenties aanwezig zijn. Ieder van deze componentgolven loopt individueel (onafhankelijk van de andere) langs grootcirkels over de oceaan. Dat begint ergens op een kust en eindigt op een tegenoverliggende kust, vaak een paar duizend kilometer verderop. De golven van lage frequentie lopen tamelijk snel (circa 40 km per uur) en die met de hoge frequenties tamelijk langzaam (circa 4 km per uur). Dit wordt ook zo berekend in deze modellen. Daarin lopen zeer veel componentgolven gelijktijdig kriskras (maar wel langs grootcirkels) over de oceaan.

De golfberekening bestaat verder uit het berekenen van het effect van de wind terwijl de golven over de oceaan lopen, van golfbreken en van onderlinge wisselwerkingen. Dat zijn vrij ingewikkelde berekeningen, die bovendien voor een groot aantal golfcom-



FIGUUR 3: Het één-dimensionale golfspectrum verdeelt de energie van onregelmatige golven over de frequenties van de in het golfveld aanwezige golfcomponenten (richtingsinformatie zoals aangegeven in figuur 2 ontbreekt).



Bron: Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de TU Delft

FIGUUR 4: De afname van de golfhoogte van onregelmatige golven in de brandingszone (de significante golfhoogte H_s) kan numeriek worden gesimuleerd met een model voor de gemiddelde dissipatie van onregelmatige watersprongen. De uitkomsten van dit model worden hier vergeleken met metingen in een laboratorium van golven nabij een geschematiseerd kustprofiel van een zandbank voor een vlak strand.

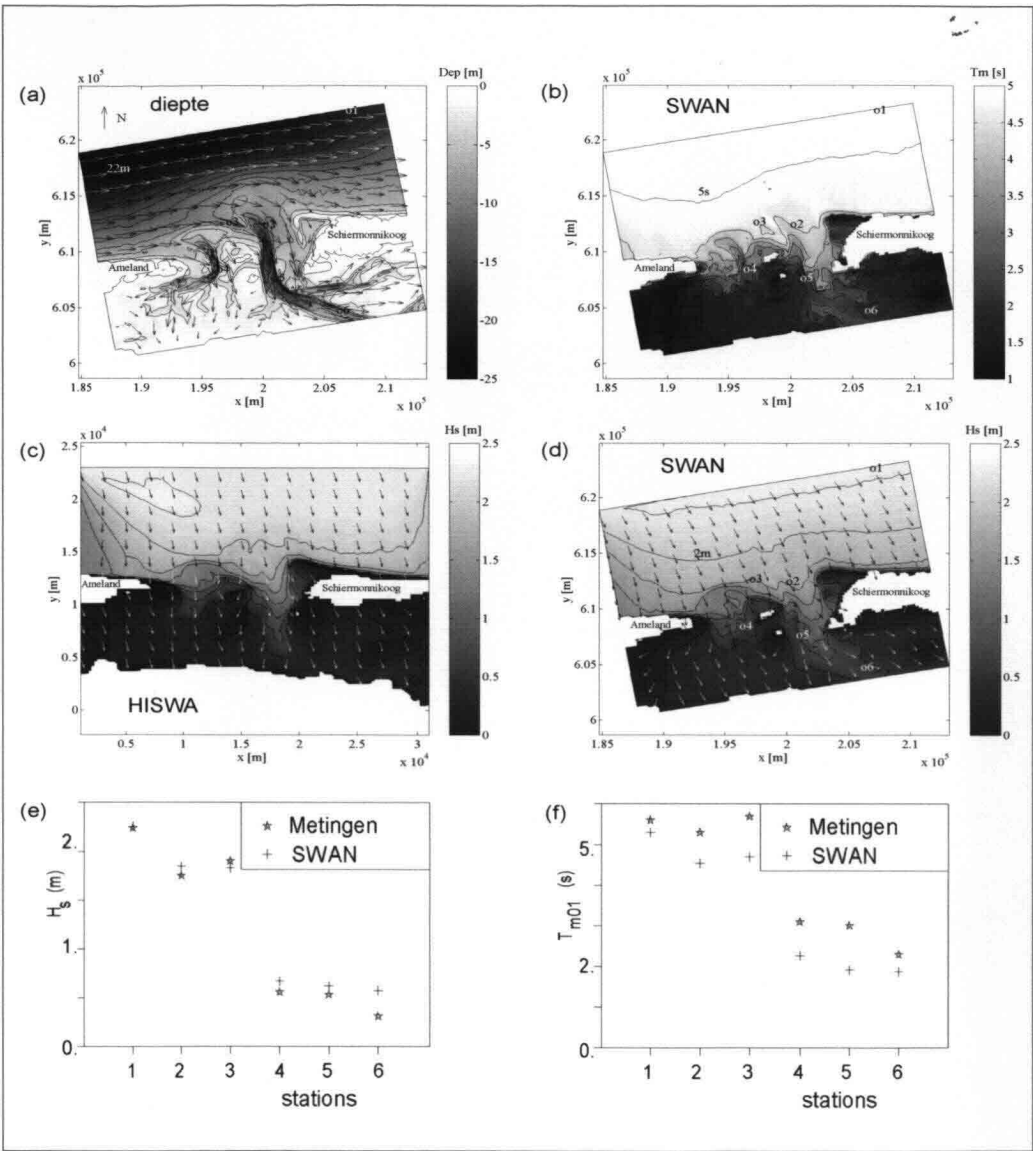
ponenten op een groot aantal plaatsen op een groot aantal tijdstippen moeten worden uitgevoerd. Geen wonder dat er grote computers nodig zijn. Het voorspellen van zeegolven op deze manier is al tientallen jaren een routinezaak en de resultaten zijn meestal redelijk goed. (Vergeet niet dat deze voorspellingen afhankelijk zijn van de weersvoorspellingen, die natuurlijk niet altijd even goed zijn.)

HET GOLFMODEL 'HISWA'

Het HISWA-model, dat naar aanleiding van de Oosterschelde-problematiek door de TU Delft werd ontwikkeld, berekent de golven op dezelfde manier als oceaanmodellen maar dan voor ondiep water met variabele diepten en stromen.

Eerdere onderzoeken die in de voorafgaande jaren binnen de vakgroep Waterbouwkunde waren verricht, hadden voor een groot deel juist betrekking op effecten van ondiep water en stroming. Een dominant proces in de kustzone is het breken van golven, wat leidt tot een sterk energieverlies. Daarvoor werd een eenvoudig, robuust en behoorlijk betrouwbaar mathematisch model ontwikkeld. De eerste toetsing van dit model vond plaats op grond van principeproeven in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Vakgroep Waterbouwkunde. Een voorbeeld van de resultaten is te zien in figuur 4, voor golven die op een geschematiseerde ondiepte gedeeltelijk breken en vervolgens doorlopen tot de waterlijn. Het model blijkt dit proces goed weer te geven en is opgenomen in het HISWA-model.

Andere onderzoeken betroffen de beïnvloeding van golven door stromen, en de richtingseigenschappen van golven. Een belangrijk nieuw gezichtspunt was dat de spreiding van golfenergie over de richtingen belangrijker was dan die over de frequenties, in tegenstelling tot de conventionele opvatting. In HISWA kon zelfs worden volstaan met het simuleren van uitsluitend de richtingsverdeling. De grote aantallen golfcomponenten, zoals die voorkomen in de oceaanmodellen, konden hierdoor drastisch worden gereduceerd. Dat scheelde een orde van grootte in de computercapaciteit. Ook werd



FIGUUR 5: Resultaten van rekenmodellen worden hier vergeleken met metingen in de Waddenzee (in het Friese Zeegat, tussen Ameland en Schiermonnikoog) op 9 oktober, 1992 om 6 uur 's morgens. figuur (a): de bodemligging en de (vloed)stroom. figuur (b): de gemiddelde golfperiode (T_m) berekend door SWAN. figuur (c): de significante golfhoogte (T_s) berekend door HISWA. figuur (d): de significante golfhoogte berekend door SWAN. figuren (e) en (f): de berekende significante golfhoogte en gemiddelde golfperiode (SWAN) vergeleken met de gemeten waarden op de meetstations 1 t/m 6.

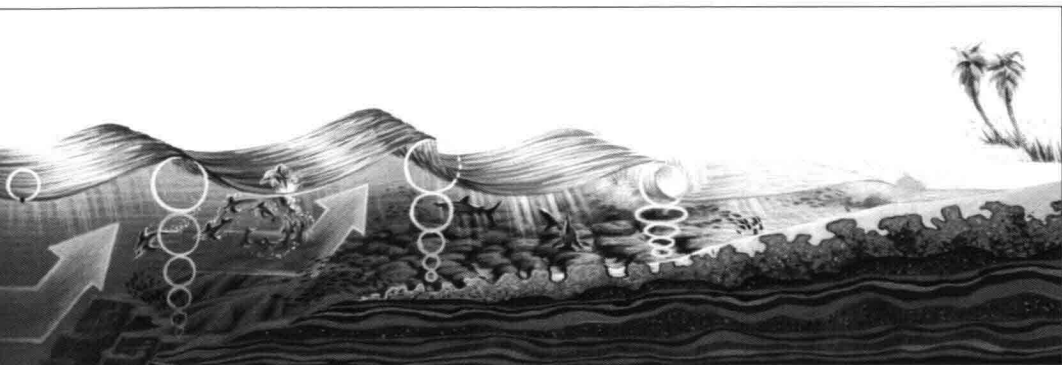
een alternatief, efficiënt rekenschema bedacht, omdat de oceanschema's bij toepassing in de kustzone tot onacceptabele rekentijden zouden leiden. De doelmatigheid scheelde ook een orde van grootte. Zo kon de totaal benodigde computercapaciteit tot acceptabele proporties worden teruggebracht, conform de opdracht.

Het op deze basis ontwikkelde HISWA-model is uitvoerig getoetst aan de hand van metingen in het laboratorium en in het veld. Het bleek in staat de golfhoogten goed uit te rekenen in de meest uiteenlopende omstandigheden nabij een kust (zelfs in getijdengebieden achter eilanden met geulen, platen en stromingen, zoals in de Waddenzee, figuur 5). Rijkswaterstaat heeft met HISWA grote delen van de Nederlandse kust 'door-gerekend' en de betrokkenen waren heel tevreden over de resultaten: het model was tegelijk robuust en redelijk betrouwbaar. Toen dit eind jaren '80 internationaal bekend werd, kwam er veel belangstelling uit het buitenland en op dit moment is HISWA het standaardmodel voor veel instituten over de hele wereld.

HET GOLFMODEL 'SWAN' Natuurlijk wilden de ingenieurs na enige jaren méér. HISWA is beperkt tot relatief kleine gebieden. Ook bleek al vrij spoedig dat HISWA niet erg goed in staat was de dominante golfperiode goed uit te rekenen. Die verandert namelijk in ondiep water als gevolg van drie processen: het breken van de golven, lokale wind die energie toevoert aan de hoogfrequente componenten, en wisselwerkingen tussen golven onderling (waardoor energie van de laagfrequente componenten wordt overgedragen aan hoogfrequente componenten). De dominante golfperiodes worden daardoor in het algemeen korter. Door het gebrek aan detail (dat willens en wetens was ingebracht om rekentijd te sparen), kon HISWA deze effecten niet goed uitrekenen.

Dit werd des te nijpender naarmate Rijkswaterstaat meer behoefte kreeg aan deze informatie in verband met nieuwe richtlijnen voor het ontwerpen van de hoogwaterkeringen. Daarom werd, wederom mede op uitdrukkelijk verzoek en met steun van Rijkswaterstaat, gewerkt aan de ontwikkeling van een nieuw, krachtiger model.

Om de problemen met HISWA op te lossen, waren twee zaken nodig: meer fundamentele kennis en grotere computers. Dat laatste ging eigenlijk vanzelf. Men hoefde maar te wachten op de nieuwe generaties computers en het probleem loste zich vanzelf op. Vooruitlopend op deze technologische ontwikkelingen is toen teruggekeerd naar het oorspronkelijke idee van de oceaanmodellen met de zeer vele individuele golfcomponenten. Daar was inmiddels ook ervaring mee opgedaan op de TU Delft en het daaruit resulterende model is inmiddels operationeel bij de Amerikaanse National Centers for



FIGUUR 6. Een "artist impression" van golven die de kust naderen. De cirkels en ellipsen geven de bewegingen weer van de waterdeeltjes onder de golven, die dus aanmerkelijk verschillen van de (voorwaartse) beweging van de golven.

Environmental Protection (NOAA/NCEP). Er zijn in feite alleen iets andere numerieke technieken gebruikt (gebaseerd op die van het HISWA-model).

Het probleem van de periodeveranderingen bleek veel hardnekkiger te zijn. Een aantal jaren lang is er theoretisch werk verricht door goede onderzoekers uit binnen- en buitenland, zonder dat er een oplossing kwam. Totdat principeproeven in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Vakgroep Waterbouwkunde aan het licht brachten dat het verschijnsel van energiedissipatie door golfbreken in ondiep water vrijwel ontkoppeld was van het verschijnsel van periodeverandering. Daardoor bleken bestaande modellen (van de TU Delft en van Deense collega's) relatief eenvoudig aan te passen, zodat ze voldoende detail gaven om de benodigde berekeningen uit te kunnen voeren. In feite was het een verrassend eenvoudige oplossing voor een probleem dat vele jaren werk heeft gekost. Het model dat al deze processen bijeenbracht, SWAN, bleek het probleem redelijk goed aan te kunnen, zoals veldmetingen inmiddels hebben aangetoond (zie figuur 5). Maar het model bestaat in feite nog maar twee jaar en zal nog verder moeten worden geverifieerd.

TOEKOMST Wellicht op basis van het feit dat de Technische Universiteit Delft in staat is gebleken om jarenlang een gebruiksvriendelijk, robuust model (HISWA) te ondersteunen met operationele assistentie en fundamenteel onderzoek, hebben de potentiële gebruikers enthousiast gereageerd op het nieuwe model (SWAN). Rijkswaterstaat heeft zoveel vertrouwen in SWAN dat hij er de gehele Nederlandse kust mee wil 'doorrekenen', te beginnen in de Westerschelde. Samen met de Amerikaanse Army & Navy heeft de dienst vergaand geïnvesteerd in de voortgezette ontwikkeling van het SWAN-model. Want ondanks het feit dat SWAN het meest geavanceerde model ter wereld is voor golven in de kustzone, blijft er behoefte aan verbetering. Zo ontbreekt bijvoorbeeld in de huidige versie het verschijnsel van golfbuiging achter obstakels (diffractie, zoals achter golfbrekers). Bovendien lijkt de golfgroei achter eilanden in het model sneller te zijn dan in werkelijkheid (waarschijnlijk door de aanwezigheid van zeer lage golven die door de gaten tussen de eilanden het wad opkomen). Ook vormt de invloed van stroming op het energieverlies van - korte - golven een probleem, dat vooral van belang is in rivieren en estuaria.

Daarnaast lijkt zich een onbedoelde ontwikkeling af te tekenen: diep water is eigenlijk een bijzonder geval van ondiep water, alle processen in SWAN reduceren naar de bekende diep-waterprocessen als de waterdiepte groot wordt gekozen. Sommige gebruikers van SWAN komen dus in de verleiding SWAN ook te gebruiken op de oceanen. Daar is de huidige versie niet geschikt voor (er is bijvoorbeeld geen voortplanting van de golven langs grootcirkels), maar met enige ingrepen is SWAN daarvoor wel geschikt te maken.

De omvang van deze investeringen is te groot voor de oorspronkelijke ontwikkelaars van de TU Delft. Andere (academische) onderzoekers zullen het leeuwendeel van deze verdere ontwikkeling voor hun rekening moeten nemen (ongeveer 20 miljoen gulden in de komende 5 jaar). De TU Delft zal wel, behalve in het onderzoek als zodanig, volledig deelnemen aan het implementeren van deze onderzoeksresultaten in SWAN. Bovendien zal de TU Delft operationele gebruikers zoals Rijkswaterstaat en het Waterloopkundig Laboratorium, assisteren. Een bijzonder aspect van deze investeringen van Rijkswaterstaat en de Amerikaanse Army & Navy is dat het resultaat zo publiek mogelijk moet zijn: het model met al zijn verbeteringen is voor iedereen vrij beschikbaar (in **public domain**). De strategische visie hierop is: door veel gebruikers en onderzoekers het model te laten gebruiken, wordt het model zeer uitvoerig getest en komen veel voorstellen tot verbeteringen direct ten goede aan de investeerders (die overigens geen commercieel belang hebben).

MIJN **DROOM:**

HET RAILVAARTUIG

Naar een nieuwe infrastructuur
voor de rivieren

B. Boon
20



Eind vorige eeuw voeren op de Europese rivieren schepen die zichzelf soms enkele honderden kilometers stroomopwaarts voorttrokken met behulp van kettingen of kabels die op de rivierbodem lagen. Hoewel besparingen op het brandstofverbruik werden bereikt van meer dan tachtig procent, verdween het systeem uiteindelijk. Maar het idee op zich was vernuftig en technisch is het moeiteloos te moderniseren. Zou het mogelijk zijn met de technologie van vandaag te profiteren van de energetische voordelen van het kettingsysteem, zonder de nadelen van honderd jaar geleden?

Dagdromen over een nieuwe infrastructuur langs de grote rivieren: met schepen die zich stiller, veiliger, schoner en goedkoper voortbewegen; boven of onder water geleid door rails.



Soms droom ik over Rijkswaterstaat. Toegegeven, niet zo vaak, maar toch. En gelukkig, meestal als ik wakker ben, niet als ik slaap.

Dan droom ik dat Rijkswaterstaat opeens langs onze grote rivieren een nieuwe infrastructuur aanlegt. Een infrastructuur waardoor de binnenvaart nog veel milieuvriendelijker wordt dan hij nu al is. Met minder luchtverontreiniging, minder geluid en misschien ook nog veiliger. En geld bespaart het ook nog. Een droom natuurlijk, maar toch.

Die infrastructuur en de daarbij behorende aanpassingen van de schepen zijn gebaseerd op een systeem van voortstuwing van schepen, dat in de tweede helft van de vorige eeuw en in het begin van de huidige enige opgang heeft gemaakt op Europese rivieren en kanalen, namelijk dat van de ketting- en kabelschepen (figuur 1). Besparingen op het brandstofverbruik van meer dan 80% zijn toen gehaald. Het systeem is desondanks uiteindelijk niet doorgebroken en geleidelijk zelfs volledig verdwenen. Deze episode uit de geschiedenis van de binnenvaart is relatief onbekend, omdat, zoals Scholl [1] zegt, gedenkboeken over het algemeen over succesvolle ondernemingen worden geschreven, over mislukkingen wordt meestal gezwegen.

De brandstofbesparing geeft al aan dat het systeem inherente voordelen biedt, waarvan

je mag vermoeden dat die nog steeds geldig zijn. Als je dan weet waaróm het niettemin een mislukking werd, zou je kunnen nagaan of de negatieve punten ervan onderzocht kunnen worden met onze tegenwoordige kennis en technologie.

Het ligt voor de hand eerst te uit te zoeken wat ketting- en kabelschepen waren en waarom zij een zoveel lager energieverbruik hadden dan traditionele schepen. Vooral is de vraag belangrijk of dat voordeel alleen te maken had met de stand van de techniek of met andere omstandigheden in de vorige eeuw, of dat het een meer tijdloos gegeven was als gevolg van natuurwetten. Daarna moet je kijken naar de negatieve aspecten van het systeem en de redenen waarom het niet het succes is geworden dat verwacht werd. Vervolgens vraag je je af of deze argumenten ook vandaag nog geldig zijn en of het mogelijk is om het geheel zo uit te voeren dat het systeem haalbaar is.

In mijn droom lukt dit allemaal en ontstaat een systeem voor de binnenvaart, dat economisch en technisch is te verwezenlijken en in ieder geval 20 à 30 % brandstofbesparing in Nederland (daarbuiten kan het meer zijn) kan bereiken. Daarnaast bestaan er andere voordelen.

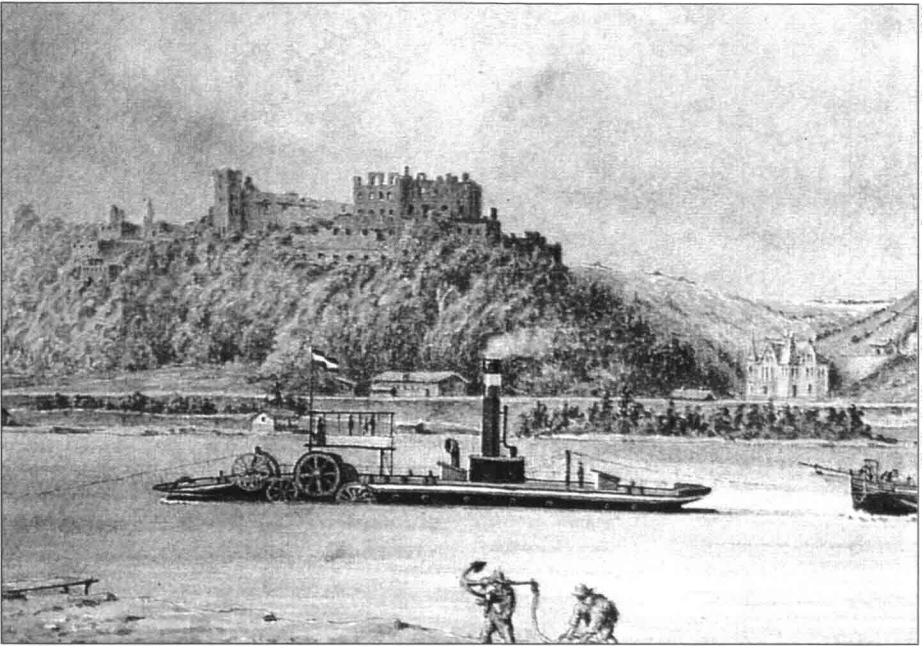
KETTING- EN KABELSCHEPEN In figuur 2 is een model van een kettingschip afgebeeld. Deze schepen zijn rond 1860 ontwikkeld als alternatief voor de stoomsleepboten, die op rivieren en kanalen werden gebruikt om een serie aken te slepen. Stoom, omdat de verbrandingsmotor nog niet bestond. Sleepboten, omdat stoommachines veel te groot en te kapitaalintensief waren om in individuele schepen gebouwd te kunnen worden. Soms werden zeilschepen gesleept op trajecten waar veel tegenstroom was, soms betrof het aken zonder enige vorm van eigen voortstuwing.

De kettingschepen, die zo'n 40 à 50 meter lang waren, dienden ook als alternatief voor de radersleepboten. Radersleepboten werden gebruikt, omdat het rendement van de scheepsschroef nog te laag was en bovendien de minimumwaterdiepte waarin men kon varen, op deze manier kleiner was.

Op de kanaal- of rivierbodem was over een lengte tot soms enkele honderden kilometers, een ketting gelegd. Deze ketting werd aan de voorzijde van het schip aan boord genomen, liep daarna over een paar horizontale of verticale kettingschijven, om via het achterschip opnieuw naar de rivierbodem te worden geleid. Door de kettingschijven aan te drijven, trok het schip zichzelf aan de ketting voort.

Op de Rijn, waar dit soort schepen iets later in gebruik werden genomen, werd de ketting vervangen door een staakabel. Deze kabel werd geleid en belast door schijven die aan de kant van het schip waren bevestigd (figuur 3). Het werkingsprincipe is volkomen vergelijkbaar met dat van de ketting. De kabel was alleen lichter, waardoor de investeringskosten lager waren. Ook de onderhoudskosten waren lager, doordat de slijtage geringer was. Ten slotte bood de kabel ook nog belangrijke operationele voordelen, zoals het makkelijker manoeuvreren met het schip en het makkelijker aan boord nemen van de kabel respectievelijk ketting.

Vrijwel altijd hadden deze schepen, hoewel zij op een vast traject voeren, toch ook nog eigen voortstuwing, met behulp van een scheepsschroef. De ketting of kabel werd stroomopwaarts gebruikt, terwijl de schepen stroomafwaarts de eigen voortstuwing gebruikten. Dit gebeurde allereerst omdat de rendementswinst stroomafwaarts veel geringer was, zodat ook het investeren in de tweede ketting of kabel niet zo gauw zou worden terugverdiend. Bovendien zou om die rendementswinst te halen, de scheepssnelheid ten opzichte van de ketting erg hoog moeten zijn, wat in wezen niet mogelijk was. Dus ondanks het kettingsysteem, toch eigen voortstuwing.



© Als die Hexen Schiffe schleppten, Ernst Kabel Verlag, Hamburg, 1985

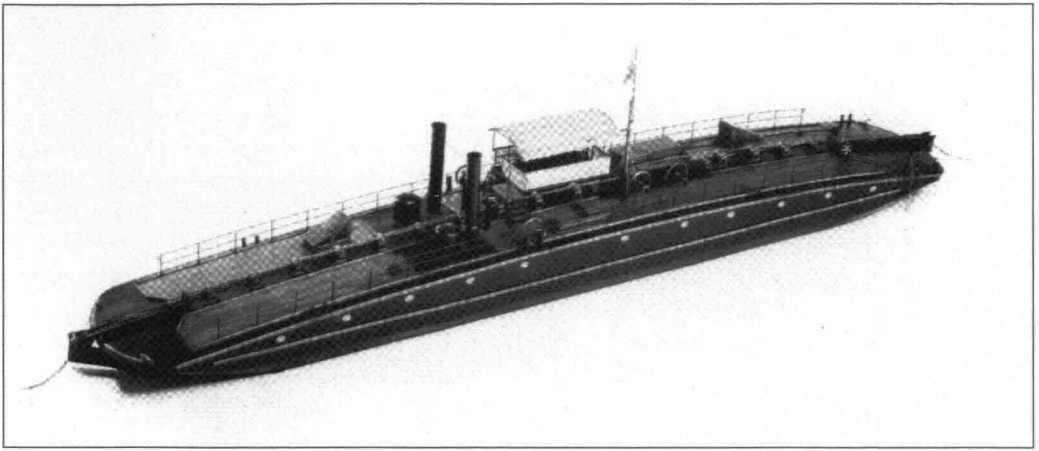
FIGUUR 1: Een kabelschip op de Rijn.

GUNSTIG ENERGIEVERBRUIK Er zijn twee redenen waarom kettingschepen (vanaf hier worden met deze term ook de kabelschepen bedoeld en vice versa; in vele opzichten zijn zij vergelijkbaar) een zoveel gunstiger energieverbruik hebben dan schepen met eigen voortstuwing. Met deze laatste aanduiding wordt bedoeld dat zulke schepen hun voortbeweging moeten halen uit interactie met het omringende water.

Eigen voortstuwing betekent altijd dat een stuwkracht wordt opgewekt, waarmee tegelijkertijd een reactiekracht van dezelfde grootte op het omringende water wordt uitgeoefend. Dit water zal dus in tegengestelde richting tot de vaarrichting worden weggestoten. Dit betekent dat energie in het water wordt gestopt en dus verloren gaat.

Het effectief benodigde vermogen, oftewel de weerstandskracht van het schip in het water vermenigvuldigd met de snelheid van het schip, is dus altijd groter dan het totaal vermogen dat aan de voortstuwder moet worden geleverd. De verhouding tussen deze twee vermogens is het voortstuwingsrendement, dat altijd kleiner is dan 1. Dit geldt voor elk type eigen voortstuwder, dus zowel voor de gebruikelijke schroeven als voor bijvoorbeeld schepraderen en waterjets. Het voortstuwingsrendement is van veel factoren afhankelijk, maar de relatieve snelheid tussen schip en water is een van de belangrijkste. Voor binnenschepen bij een optimale snelheid (die natuurlijk lang niet altijd gevaaren wordt) is het rendement meestal niet meer dan 50%.

Bij een kettingschip creëert de voortstuwingskracht natuurlijk ook een reactiekracht in de ketting. Omdat deze vast is verbonden met de aarde (al was het maar door zijn eigen gewicht), resulteert dit niet in een energie die in de ketting verloren gaat. In dat opzicht zou het voortstuwingsrendement 100% kunnen zijn. In de praktijk gaat wel enige energie verloren, in wrijving in de ketting, tussen de ketting en de schijven en in het verschuiven en verplaatsen van de ketting op de rivierbodem. Maar deze verliezen zijn klein vergeleken met die bij gebruik van het water als 'reactie-medium'. Dit is een fundamenteel fysisch verschijnsel dat altijd zal blijven gelden.



FIGUUR 2: Model van een kettingschip zoals gebruikt op de Neckar.

De mislukking van de ketting- en kabelschepen kan ondervangen worden met de huidige technologie.

De tweede reden voor het goede rendement van kettingschepen geldt alleen bij varen tegen stromend water in. De kracht die nodig is om het schip voort te stuwten, is afhankelijk van de relatieve snelheid van het schip ten opzichte van het omringende water (afgezien van enig effect van de nabijheid van de rivierbodem). Het verband wordt vaak als kwadratisch beschouwd. Dus bij een absolute scheepssnelheid v_1 en een (tegen-) stroomsnelheid van het water v_2 is de te overwinnen weerstand evenredig met $(v_1 + v_2)^2$. Het vermogen dat nodig is om dit te leveren, is het product van deze kracht en de relatieve snelheid van het 'reactiemedium' ten opzichte van het schip. Bij eigen voortstuwing is het benodigde vermogen dus evenredig met $(v_1 + v_2)^3$, terwijl dat bij een ketting evenredig is met $(v_1 + v_2)^2 v_1$, een winst van $(v_1 + v_2)^2 v_2$, of in relatieve termen een winst van $v_2/100(v_1 + v_2)\%$. Bij een scheepssnelheid van bijvoorbeeld 15 km/uur en een stroomsnelheid van 3 km/uur betekent dit al een winst van zo'n 17%. Plastisch uitgedrukt: om een schip op zijn plaats te houden in tegenstroom is bij gebruik van eigen voortstuwing een vermogen nodig evenredig met de derde macht van de stroomsnelheid. Een schip dat in tegenstroom op zijn plaats wordt gehouden door zich aan een ketting vast te houden, heeft hiervoor geen energie nodig. De winst is dus het grootst bij grote stroomsnelheden en relatief kleine eigen snelheid (zoals bij de gesleepte schepen in de vorige eeuw gebruikelijk was). De ketting- en kabelschepen zijn dan ook vooral gebruikt in relatief snel stromende rivieren, zoals de Rijn in het Duitse middelgebergte. Ook deze reden voor de goede efficiëntie van het kettingsysteem is fundamenteel fysisch en dus altijd geldig.

Waarschijnlijk zijn er behalve deze fundamentele redenen, nog enkele andere redenen geweest die tot het hoger rendement hebben geleid. De belangrijkste hiervan is het hydrodynamisch rendement van de toen gebruikte eigen voortstuwingsmiddelen. Tussen ketting- en kabelschepen enerzijds en radarsleepboten anderzijds was een 20% lager brandstofverbruik waar te nemen ten gunste van ketting- en kabelschepen. De vergelijking gold echter voor radarsleepboten, terwijl kort daarna de schroef voor zulke vaartuigen werd geïntroduceerd. Het rendement van zowel de schroefpraden als van de schroeven die toen gebruikt werden, lag waarschijnlijk ruim onder wat tegenwoordig mogelijk is. Het rendement van de mechanische kettingaandrijving zal, ook toen al, erg hoog zijn geweest. Je mag dus verwachten dat dit rendementsverschil ook te maken had met de stand van de toenmalige techniek en nu niet meer geldig is.

Natuurlijk dringt, gezien het bijzonder gunstige rendement, de vraag zich op waarom het kabelsysteem niettemin na een relatief korte tijd geheel is verlaten. Over de Rijn heeft Scholl [1] uitvoerig gerapporteerd. Er blijkt een veelheid van redenen te zijn, waarvan de belangrijkste nu beschouwd worden.

Het systeem werd geïnstalleerd en geëxploiteerd door een maatschappij. Deze maatschappij heeft het systeem ontwikkeld, de kabel gelegd en de boten laten bouwen. Andere bedrijven mochten (men wilde een monopolie hebben) en konden (de bouw van de boten zou te duur zijn) het systeem niet gebruiken. Dat betekende dat de kabel maar ongeveer eens per week werd gebruikt. Een toch wel laag aantal, gezien de vrij hoge investeringskosten voor het leggen van de kabel.

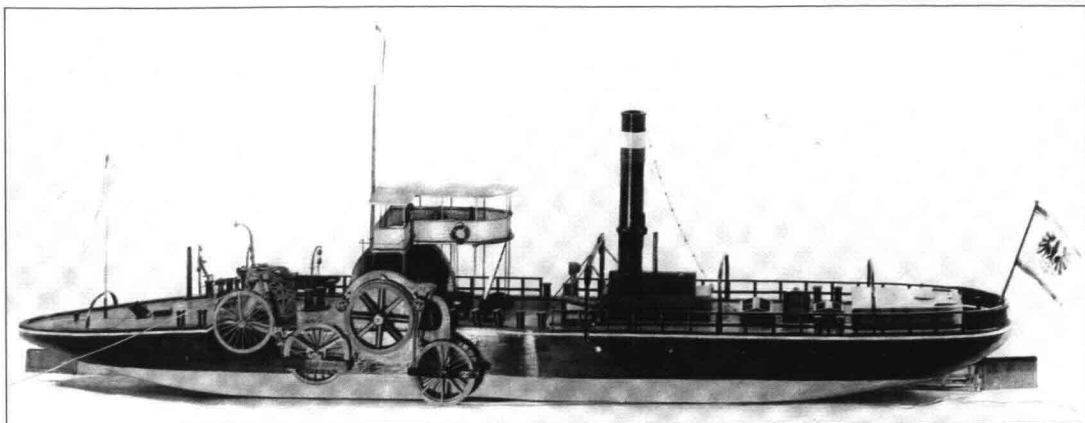
Bij de beslissing om het systeem aan te leggen, werd uitgegaan van een snel stijgende prijs voor de energie, namelijk steenkool. Dit zou betekenen dat de besparing op brandstofkosten (20%) al gauw de investering zou doen terugverdienen. In werkelijkheid daalde de kolenprijs echter, zodat de winstmarge voor het bedrijf sterk gedrukt werd. Uiteindelijk werden verliezen geleden. Hierbij moet worden bedacht dat de kabel in het begin alweer na een paar jaar moest worden vernieuwd. Hoewel de levensduur later omhoog kon worden geschroefd, bleven de onderhoudskosten zwaar op het exploitatieresultaat drukken. Veel verscheperen, vooral van massagoederen zoals steenkool, hadden hun eigen scheepvaartmaatschappij, inclusief sleepboten, en zij maakten geen gebruik van de kabelschepen. Sleepbootrederijen probeerden bovendien contracten te sluiten voor de hele sleepreis, dus zowel voor gedeeltes waar een kabel lag als voor delen waar hij niet lag. Hoewel de kabelschepeneigenaar later ook sleepboten met eigen voortstuwing had, ging vrij veel tijd verloren met het overgeven van de sleep van en naar het kabelschip.

Er waren ook praktische problemen, zoals de intrinsiek moeilijke kruising met veerponten die hetzelfde voortstuwingssysteem hadden. Zij gebruikten kabels die dwars over de rivier lagen en hadden oudere rechten. Bij lage stroomsnelheden, zoals tussen Emmerik en Ruhrort, werd de kabel al snel met slib bedekt. Als er een schip gebruik van moest maken, was het erg moeilijk (tijd- en energierovend) om de kabel omhoog te trekken. Dit alles leidde ertoe dat het gebruik van kabelschepen op de Rijn kort na 1900 werd gestopt. Op andere rivieren, zoals de Neckar, werden kettingschepen nog enkele decennia langer gebruikt.

De invoering van de verbrandingsmotor in de binnenvaart zou ongetwijfeld de genadeklap voor het systeem hebben betekend, als die toen nog van belang was geweest. Immers, verbrandingsmotoren zijn veel kleiner dan stoommachines met hetzelfde vermogen en voor de bediening is veel minder extra bemanning nodig. Dit betekende dat individuele schepen hun eigen voortstuwingmachine aan boord konden hebben. Maar zulke schepen konden (door afmetingen en inrichting) en mochten (vanwege de monopoliepositie) geen gebruik maken van eventueel aanwezige kettingen of kabels. Bovendien wilde men met die schepen overal naartoe kunnen gaan, zodat het nu algemene systeem van eigen voortstuwing aloverheersend werd. Nogmaals: het gevecht tussen ketting en kabel en verbrandingsmotor is nooit echt gevoerd, maar zou ongetwijfeld door de laatste gewonnen zijn.

Zou het mogelijk zijn met de technologie van vandaag de energetische voordelen van het kettingsysteem te genieten, zonder de nadelen die het honderd jaar geleden had?

Nu beginnen de dagdromen. Het gevoel gaat leven dat het moet kunnen. En er ontwikkelen zich steeds meer technische alternatieven. Nieuwe problemen ga je zien, maar ook steeds meer potenties.



FIGUUR 3: Schaalmodel van de Rheintauer, een Duitse kabelboot van eind negentiende eeuw.

Steeds weer blijkt het technisch inzicht van onze voorvaders bewonderenswaardig geweest te zijn.

Het eerste dat je bedenkt is dat je nu niet langer sleepboten zou moeten gebruiken, maar dat individuele schepen gebruik moeten kunnen maken van het systeem. En dat niet een bedrijf het monopolie mag hebben, maar dat het systeem toegankelijk moet zijn voor iedereen. De infrastructuur moet dus door de overheid worden geleverd. Hier is het dat je Rijkswaterstaat in je dromen betreft. Het is niet belangrijk of het gebruik van de structuur 'gratis' is, dat er abonnementsmogelijkheden zijn of dat er per kilometer betaald moet worden. Essentieel is dat een groot aantal schepen er gebruik van kan maken, ook direct na elkaar.

Bij de technische invulling van deze operationele eis is onmiddellijk duidelijk dat het oude ketting- of kabelsysteem ongeschikt is. De ketting aan de voorzijde van het schip opnemen, deze over het schip en de schijven leiden en haar daarna over het achterschip weer naar de rivierbodem laten zakken - dit kan onmogelijk gebruikt worden bij relatief (ten opzichte van de situatie in de vorige eeuw) snel varende schepen, die elkaar bovendien ook nog snel na elkaar opvolgen. Daar komt nog bij dat dit optillen en weer neerleggen waarschijnlijk een vrij groot energieverlies veroorzaakt, dat de ketting mogelijk steeds op een andere plaats van de rivierbodem komt te liggen en dat het vrij moeilijk wordt de ketting snel in en uit te scheren teneinde het schip ook vrij van de ketting te kunnen laten zijn.

Het ligt eerder voor de hand te denken aan een ketting die op de bodem blijft liggen, terwijl een met het schip verbonden aandrijfeenheid onder water zich langs de ketting voorttrekt en het schip daarboven meesleept. Je kunt spreken over een onderwaterlocomotief die zich langs een onderwaterrail voortbeweegt en het vaartuig meetrekt: **het railvaartuig**. Dat deze gedachte voor de hand ligt, bleek toen ik later las dat al in 1912 ene Richard Koß in Münster een schip zich liet voorttrekken langs een op de kanaalbodem liggende H-balk. Dit gebeurde met behulp van twee tegen de balk gedrukte wielstellen, die via een as vanaf het schip werden aangedreven. Natuurlijk werd het geheel aangeduid als de **Wassereisenbahn**. Steeds weer blijkt het technisch inzicht van onze voorvaders bewonderenswaardig geweest te zijn [2]. Maar ook Koß miste de technische hulpmiddelen die we vandaag hebben en ook zijn systeem heeft geen doorbraak beleefd.

De onderwaterlocomotief moet natuurlijk zo zijn uitgevoerd dat zij makkelijk los- en vastgemaakt kan worden aan wat we verder de rail zullen noemen. Het meest kansrijk is waarschijnlijk de locomotief via een soort trekstang scharnierend aan het schip te

verbinden. Deze trekstang kan dan bijvoorbeeld met behulp van enkele hydraulische cilinders worden gestuurd, waarbij de sturing wordt geregeld via sensoren die de positie van de locomotief ten opzichte van de rail vaststellen. Dergelijke sensoren moeten ontwikkeld worden, maar dit moet mogelijk zijn, bijvoorbeeld met metaaldetectoren of sensoren die het magnetisch veld rond een op de rail aangebrachte elektrische stroomdraad kunnen onderkennen. De aandrijving van de locomotief gebeurt waarschijnlijk hydraulisch of elektrisch, waarbij de hoofdenergiebron in het schip zelf staat. Het geheel moet eenvoudig vanaf de brug van het schip bediend kunnen worden.

Waarschijnlijk wil je het schip toch ook nog met een traditionele scheepsschroef uitrusten, om ook te kunnen varen langs water waar de rail niet aanwezig is. Op minder druk bevaren wateren zal het aanbrengen van deze infrastructuur mogelijk te duur zijn. Maar de eigen voortstuwning kan ook gebruikt worden voor het manoeuvreren of bij het ingehaald worden door andere schepen die de rail gebruiken. Bij dit laatste moeten er verkeersregels worden opgesteld. Daarbij is het energetisch het verstandigst om het in te halen schip zich te laten loskoppelen en niet het snelste schip bij deze manoeuvre extra voortstuwingskracht uit de 'inefficiënte' scheepsschroef te laten halen.

Het is erg verleidelijk om het opwekken van de energie niet te laten gebeuren door de motor aan boord van het schip, maar deze energie toe te voeren van buitenaf, via iets dat aan de rail verbonden is. Maar een stroomdraad zoals de bovenleiding van treinen, is onder water natuurlijk niet mogelijk. En dat is jammer, want de grootschalige elektriciteitsopwekking die dan mogelijk wordt, zou nog meer rendements- en milieuvoordelen kunnen opleveren. Misschien is er in de toekomst iets mogelijk met bijvoorbeeld contactloze overdracht van energie. Maar met de huidige stand van de techniek is dit geen haalbare optie.

Als je dan bij deze laatste overwegingen bent aangekomen, ga je als vanzelf denken



© Jurjen Drenth

Op de Waal bij Tiel.

aan de mogelijkheid de rail niet onder water, maar daarboven te installeren. Dan wordt het wel mogelijk de toevoer van elektrische energie te combineren met de rail. Zo'n rail zou laag boven het water moeten worden aangebracht om zo effectief mogelijk te zijn met betrekking tot de krachtsoverdracht. Bovendien voorkom je zo horizonvervuiling. De aandrijfarm aan het schip zou in dat geval naar opzij moeten gaan in plaats van naar beneden. Dit betekent een excentrische voortstuwing, maar die kan gecompenseerd worden door niet alleen aan de voorzijde van het schip zo'n arm te bevestigen, maar ook aan het achterschip. Als de rail dan ook nog horizontale dwarskrachten kan opvangen, is het koersprobleem opgelost.

Deze versie maakt natuurlijk het vast- en loskoppelen eenvoudiger. Je hoeft het niet onzichtbaar onder water te doen. Daar staat tegenover dat bij iedere splitsing van de waterwegen de rail onderbroken moet worden en de locomotief bij het passeren weer los- en vastgekoppeld moet worden. Bovendien is het voor niemand meer mogelijk om tussen de doorgangen door de oever te bereiken. Zeker schippers van plezierboten zullen dat niet op prijs stellen. Het is de vraag of de voordelen van deze bovenwateruitvoering uiteindelijk opwegen tegen de nadelen. De onderwateruitvoering vraagt wel meer innovatieve technologieën, maar als deze ontwikkeld zijn (de benodigde basis-kennis bestaat) heeft zij veel voordelen ten opzichte van de bovenwateruitvoering. Overigens zijn ook voor de bovenwateruitvoering historische parallellen aanwezig: schepen die door een locomotief langs de kanaaloever werden voortgetrokken; de gemechaniseerde versie van het aloude jagen van schepen met mensen of paarden.

Zowel voor het onderwater- als voor het bovenwatersysteem bestaan veel alternatieve mogelijkheden. Die betreffen grote, het gehele systeem omvattende vragen als 'Wel of geen energietoevoer gecombineerd met de rail?' en detailvragen als 'Hoe moet een onderwaterrail er uit zien, opdat het risico van door modder ondergespoeld worden aanvaardbaar klein is?' Er worden als vanzelf verdergaande suggesties opgeroepen, waarbij zich dankzij zo'n systeem nóg meer mogelijkheden aandienen. Zoals: Zou het bijvoorbeeld kunnen dat de besturing van de schepen meer geautomatiseerd plaatsvindt omdat je altijd een heel duidelijk meetbare plaatsbepaling hebt? Is het dan misschien mogelijk schepen dichters na elkaar te laten varen, misschien wel zo dichtbij dat het totale hydrodynamische rendement van zo'n trein groter is dan dat van de afzonderlijke schepen? Moet je dan de mogelijkheid inbouwen dat het schip ook kan afremmen, door kracht op de rail uit te oefenen en er dus een kortere remweg ontstaat dan traditioneel, wat de veiligheid zou bevorderen? Wat zou de beste sensoroptie van het onderwatersysteem zijn? Hoe zit het met de regelgeving in het vaarreglement? Zou zo'n systeem gevolgen hebben voor de structuur van de binnenvaart, met andere woorden is het toepasbaar met het traditionele door de familie gerunde schip? Veel vragen. Die te beantwoorden zijn, maar wel een uitgebreide interdisciplinaire onderzoeksinspanning vergen.

TENSLOTTE Een binnenschip dat zich voortbeweegt door zich aan een rail voort te trekken, heeft 20 à 50% minder energie nodig dan wanneer de traditionele scheepsschroef wordt gebruikt. De grootte van de besparing hangt af van de omstandigheden, vooral of de vaart in stromend water (rivier) of in stilstaand water (kanaal) moet plaatsvinden. Het schip moet daartoe uitgerust worden met additionele middelen, zoals een stuurbare aandrijfarm. Gezien de potentiële brandstofbesparing kan deze extra investering in het schip zich op sommige routes (de Rijn) binnen een paar jaar terugverdienen. Technisch is de ontwikkeling van zo'n systeem met de huidige kennis goed mogelijk.

Voorwaarde is wel dat de infrastructuur door de overheid wordt aangelegd. Hoe het gebruik ervan in rekening wordt gebracht, is een kwestie van politiek. Wel is het van belang dat dit in internationaal verband gebeurt, omdat beperking tot de Nederlandse wateren voor de meeste schepen een te kleine besparing zouden opleveren.

Een goede haalbaarheidsstudie zou de uitgangspunten moeten controleren. De verdere ontwikkeling vraagt een duidelijk interdisciplinaire aanpak.

Als het systeem haalbaar is, is het waarschijnlijk ook mogelijk additionele voordelen te behalen, met name op het gebied van de veiligheid van de binnenscheepvaart.

NOTEN

- 1 Scholl, L.U.: 'Als die Hexen Schiffe schleppten; die Geschichte der Ketten- und Seilschleppfahrt auf dem Rhein', Ernst Kabel Verlag, Hamburg, 1985.
- 2 Teubert, O., Teubert, W.: 'Die Binnenschiffahrt', 2te Aufl., Wilhelm Engelmann, Leipzig, 1932
- 3 Teubert, W.: 'Die Flußschiffbau', Verlag Bernh. Friedr. Voigt, Leipzig, 1920
- 4 An.: 'Schiffahrt-Museum im Schloßturn Düsseldorf Altstadt', Stadtmuseum Düsseldorf, z.j.

EEN WATERFILM IN PLAATS
VAN **WIELEN**

**Sluisdeuren: rollen of glijden,
zoeken naar de minste weerstand voor
beweegbare waterkeringen**

21
A. van Beek
R.A.J. van Ostayen

• • •

Verreweg de meeste sluisdeuren worden gedragen door rolwagens, die nogal onderhoudsgevoelig zijn. Maar er is nu een alternatief voorhanden: de onderhoudsarme glijdeur. Samen met de sectie Tribotechniek van de TU Delft heeft Rijkswaterstaat daartoe hydrovoeten ontwikkeld, in de werktuigbouwkunde aangeduid als hydrostatische lagers. Bij de Prins Willem Alexandersluis in Amsterdam is het principe voor het eerst toegepast - met zoveel succes dat hydrovoeten zich niet alleen voor andere (renovaties van) sluisdeuren lenen, maar ook voor scheepsliften en containerkadekranen.

• • •

De Prins Willem Alexandersluis is onderdeel van de Oranjesluizen in Schellingwoude (gemeente Amsterdam). Door schaalvergroting van de beroepsvaart en een explosieve groei van de recreatievaart was de schutcapaciteit van dit sluisencomplex ontoereikend geworden. Daarom werd besloten tot de bouw van een vierde kolk, de Prins Willem Alexandersluis. Deze nieuwe Oranjesluis werd op 9 maart 1995 officieel geopend. Zij verschaft de grootste binnenvaartschepen en vierbakduwcombinaties doorgang van het IJsselmeer naar het Noordzeekanaal, via het buiten IJ en het binnen IJ.

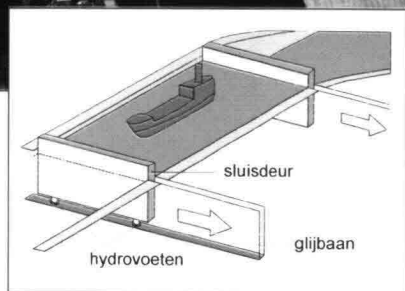
Sluisdeuren werden tot nog toe gedragen op wagens die met wielen over rails rijden, de zogenaamde roldeuren. Door de gecombineerde horizontale en verticale belasting zijn deze rails onderhevig aan hoge slijtage en uitwalsen. Verder zijn de onderhoudsgevoelige, bewegende delen die zich onder water bevinden, moeilijk te inspecteren, te onderhouden en te vervangen. Bij de Prins Willem Alexandersluis werd gekozen voor de oplossing om de railbaan te vervangen door een kunststof glijbaan.

In samenwerking met de TU Delft werden daartoe ronde hydrovoeten ontwikkeld, het zogenaamde hydrostatisch lager dat over de glijbaan beweegt. Bij IHC-Lagersmit is het experimenteel onderzoek uitgevoerd aan een model op ware grootte. De glijdeuren zijn in maart 1995 geïnstalleerd. Rijkswaterstaat was hiermee de eerste ter wereld die op basis van volledige watersmering een sluisdeur heeft ontworpen en gerealiseerd. Het water wordt daarbij uit de kolk gepompt, gefilterd en tussen de hydrovoet en de glijbaan geperst (pompp vermogen 10 kW, pompdruk 22 bar). De belasting per hydrovoet bedraagt nominaal 25 ton, de diameter van de hydrovoet is 750 mm. Tussen de hydro-

Rijkswaterstaat is de eerste ter wereld die een sluisdeur op basis van watersmering heeft gerealiseerd.



Deel van het Oranjesluizencomplex tussen het Binnen en Buiten IJ bij Amsterdam, waarin hydrostatistische lagers zijn aangebracht.

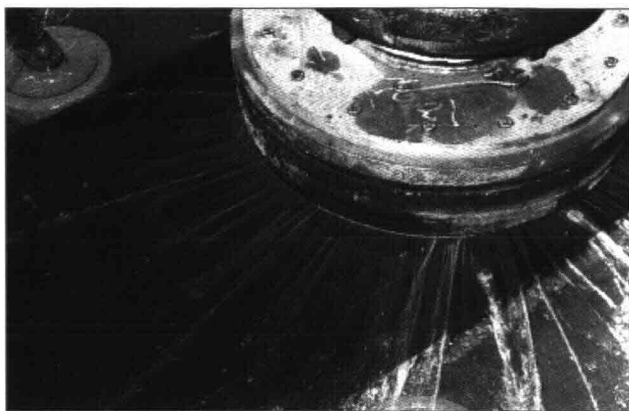


Positie van de sluisdeuren met hydrostatistische lagers.

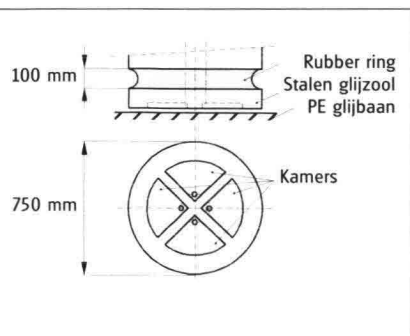
voet en de glijbaan ontstaat een 0.1 mm dunne waterfilm. De sluis zelf heeft een nuttige lengte van 200 m en is 24 m breed. De deuren zijn 7 m hoog, 25 m lang en 3 m breed. De bovenkant van de deur dient als rijdek voor landverkeer. Het droog gewicht van een sluisdeur is 180 ton. Door luchtkisten in de deur wordt dit gewicht in het water gereduceerd tot 50 ton.

De sluisdeuren worden op hun kant aangevoerd op een drijvend dok. Twee hydrovoeten en twee vaste draagvoeten zijn zichtbaar. De vaste draagvoeten zijn nodig bij demontage van de hydrovoeten. Er zijn drie deuren gemaakt, waarvan één deur dient als reserve deur bij calamiteiten, zoals aanvaringen. Bij ingebruikname van de reserve deur moet het hydrosysteem met hydrovoeten worden overgezet.

SLECHTS TWEE JAAR Het ontwerpen van de glijdeuren heeft, van de opdracht van RWS aan de TU Delft in 1987 tot de eindontwikkeling, slechts twee jaar geduurd. Tijdens het ontwerp is er rekening mee gehouden, dat de gewenste vlakheid van 0.5 mm/m van de glijbaan moeilijk is te realiseren. Het materiaal is zodanig gekozen dat de



Hydrostatische voet tijdens proeven.



orsnede van een hydrostatische lager.



De sluisdeuren worden met een drijvende bok op hun plaats gehesen. Linksonderaan de deur is een van de hydrostatische lagers zichtbaar.

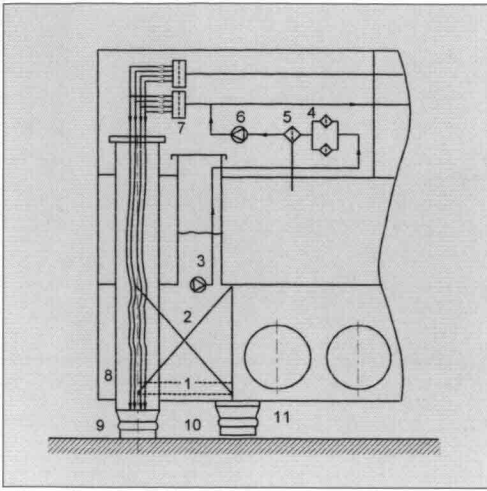
glijbaan na het inlopen vanzelf de ideale vlakheid zal aannemen, waarna weinig of geen contact meer tussen de hydrovoet en de glijbaan optreedt.

Kort na het in bedrijf nemen van de sluisdeur bleek de lagercoëfficiënt (wrijvingscoëfficiënt) circa 0.05. Zonder waterfilm zou de lagercoëfficiënt 0.12 bedragen (Ultra High Molecular Weight Poly Ethylene-RVS), met een volledige waterfilm 0.001. Dit betekent dat circa 60% van de belasting door de waterfilm wordt gedragen, de rest van de belasting door het contact tussen de hydrovoet en de glijbaan.

Na enkele honderden passages bleek dat de lagercoëfficiënt zodanig is afgenomen dat de gewenste volledige scheiding van de oppervlakken door een waterfilm is bereikt. Hierdoor is een onderhouds- en slijtagevrij systeem verkregen.

Voor nieuw te construeren sluisdeuren wordt onderzocht in hoeverre het hydrosysteem kan worden vereenvoudigd door het aantal water-inspuitpunten te verminderen. Hierbij wordt gestreefd naar een hydrovoet met een enkelvoudig inspuitpunt, die de golving in het glijbaan oppervlak elastisch kan volgen. Verder is de wens geuit om langwerpige hydrovoeten te ontwerpen voor de zijwaartse geleiding van de sluisdeur, zogenaamde hydrofenders. Deze langwerpige hydrovoeten zouden bovendien onder de sluisdeur gebruikt kunnen worden en daarmee de ronde hydrovoeten kunnen vervangen. De glijbaan kan dan smaller worden.

Belastingen tot 40 ton per hydrovoet worden gedragen door een waterfilm



- 1 inlaatrooster
- 2 benzinetank
- 3 onderwaterpomp
- 4 duplex filter
- 5 automatische terugspoelfilter
- 6 perspomp
- 7 restricties
- 8 cilinders
- 9 hydrovoet
- 10 glijbaan
- 11 vaste draagvoet

Glijdeur met hydrosysteem.

Bij langwerpige hydrovoeten zal met eenzelfde oppervlak wel een grotere lengte van de hydrovoet nodig zijn. Hierdoor neemt het belang van het elastisch volgen van golvingen in de glijbaan toe.

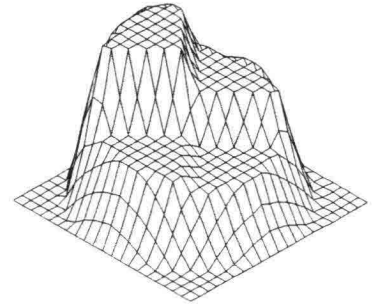
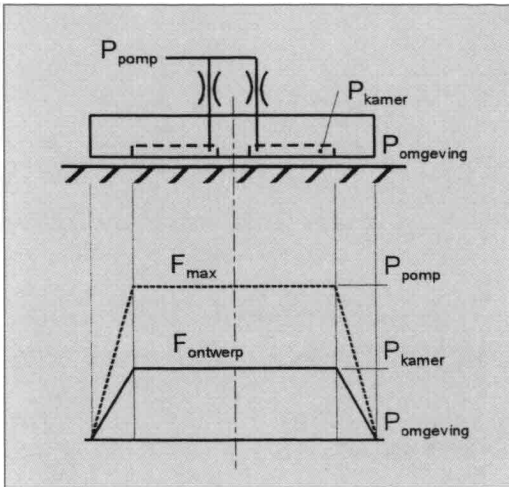
ONTWERP VAN DE HYDROVOET

De hydrovoet bestaat uit een roestvaststalen, ronde schijf, de glijzool, met een diameter van 750 mm waarin vier kamers zijn uitgespaard. Elke kamer heeft een eigen inspuitspunt. De glijzool is via een 100 mm dikke rubbering die als elastisch scharnier functioneert, onder de sluisdeur gemonteerd. De glijzool rust op een vlakke glijbaan van polyethylen platen (UHMWPE: Ultra High Molecular Weight Poly Ethylene). Deze platen zijn met lijmankers direct op een betonnen drempel in het sluishoofd gemonteerd.

De hydrovoet is aan een stalen cilinder gemonteerd, waardoor het mogelijk is deze via een opening in het rijdek gemakkelijk uit de glijdeur te halen. De deur staat dan op twee vaste draagvoeten. Bovenin de glijdeur zijn twee pompkamers geprojecteerd. De pompen zijn beurtelings in gebruik. Als een van beide pompen door storing buiten werking treedt, neemt de andere pomp het over. Bij een storing van beide pompen kan de deur nog met een lagere snelheid (0.06 m/s i.p.v. 0.24 m/s) bewegen. De waterfilm is dan niet aanwezig, waardoor een zekere warmteontwikkeling een beperking legt aan de bewegingssnelheid.

Als de druk van het water dat in de kamers van de glijzool wordt geperst voldoende is voor de vereiste hefkracht, een kamerdruk van 9 bar, wordt de deur gelift en spuit het water tussen glijbaan en glijzool naar buiten. De glijzool is dan door een waterfilm gescheiden van de glijbaan. De dikte van de waterfilm hangt af van de pompcapaciteit. Gekozen is voor een nominale filmdikte van 0.1 mm, wat in een benodigd effectief pompvermogen resulteert van 10 kW, voor beide hydrovoeten samen. Aangezien de drukstroming evenredig is aan de dikte van de waterfilm tot de derde macht, zou voor een twee maal grotere filmdikte een acht maal groter pompvermogen nodig zijn.

Het water wordt uit de kolk aangezogen door een rooster dat zich zo'n 3 meter onder water bevindt, en met een onderwaterpomp door een duplex korffilter geperst (filterfijnheid 10 mm). Na het duplexfilter passeert het water een automatisch terugspoelfilter



Drukverdeling in de waterfilm onder de hydrovoet bij scheefstelling.

(filterfijnheid 0.1 mm). Met een zeventraps centrifugaalpomp van 10 kW wordt het water op een druk van circa 22 bar gebracht. Het water gaat naar beide hydrovoeten en passeert daarbij een restrictie-eenheid. Die eenheid bestaat uit een plaat met vier gaatjes (diameter 5 mm), die als stromingsweerstand dienen.

Het oppervlak van de hydrovoet is zodanig gekozen dat bij een kamerdruk, lager dan de pompdruk, de ontwerpbelasting kan worden gedragen. De filmdikte die ontstaat bij de ontwerpbelasting, wordt bepaald door het pompdebiet. In de toevoerleiding is een restrictie aangebracht, waardoor de pompdruk, afhankelijk van het debiet, afvalt tot de gewenste kamerdruk. Bij verhoging van de belasting neemt de filmdikte onder de hydrovoet af en daarmee het debiet. Een lager debiet heeft een kleinere drukval over de restrictie tot gevolg, waardoor de kamerdruk toeneemt. Zo kan zich een nieuw evenwicht instellen.

Met een ontwerpbelasting van 25 ton per hydrovoet valt de pompdruk van 22 bar af, over de restrictie-unit, tot een kamerdruk van circa 9 bar. Bij een maximale belasting, waarbij voor het eerst contact tussen de hydrovoet en de glijbaan ontstaat, is het debiet minimaal en zal de kamerdruk zijn toegenomen tot de pompdruk. Belastingen tot 40 ton per hydrovoet kunnen zo door de waterfilm worden gedragen.

SCHEEFSTELLING, BAANGOLVING, BELASTBAARHEID Doordat gedefinieerde stromingsweerstand in de toevoerleiding tussen de pomp en de inspuitspunten in de kamers zijn opgenomen, is het mogelijk dat er een drukverschil tussen de kamers onderling ontstaat. Dit is nodig voor het onderhouden van de film bij scheefhellen van de glijdeur. Zonder scheefstelling wordt de pompdruk door deze restricties gereduceerd van 22 bar naar een kamerdruk van 9 bar.

Als de deur scheef hangt ten opzichte van de glijbaan zal de filmdikte lokaal - bij een van de kamers - kleiner worden, waardoor de stromingsweerstand vanuit deze kamer toeneemt. Door de lokaal toenemende stromingsweerstand in de film ten aanzien van de stromingsweerstand in de toevoerleiding, ontstaat een drukverdeling die resulteert in een aan de scheefstelling tegengesteld moment (zie afbeelding drukverdeling).

Waar de filmdikte minimaal is, ontstaat de hoogste kamerdruk, wat in een terugstelmoment resulteert.

Van de opdracht tot de eindontwikkeling heeft het ontwerp slechts twee jaar gevegd.



Een van de 180 ton zware sluisdeuren wordt nog aan een laatste inspectie onderworpen voor ze op haar plek wordt gehesen.

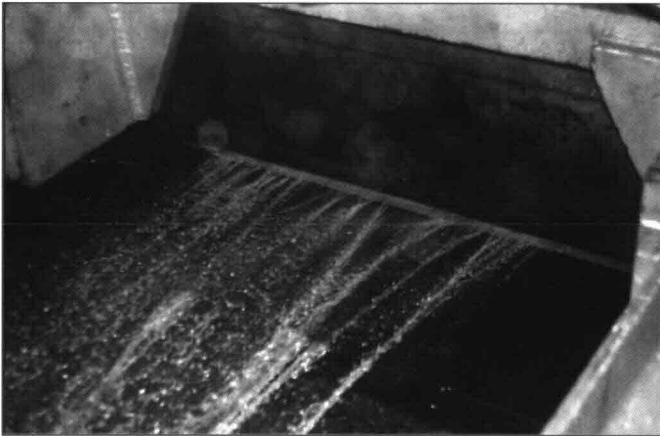
Door de glijzool met een rubber scharnier, een 10 cm dikke rubberring, te ondersteunen, resulteert dit moment in een terugstelbeweging. Ook als de hydrovoet baangolvingen passeert, volgt deze de golvingen automatisch.

Golvingen met een lengte kleiner dan de diameter van de hydrovoet en groter dan de filmdikte kunnen niet door scharnieren worden gevolgd. Hierdoor raakt de waterfilm lokaal verstoord en ontstaat mechanisch contact tussen hydrovoet en glijbaan. Uit metingen van de lagercoëfficiënt is ondertussen gebleken dat na een aantal passages de toppen van deze golvingen afslijten. Door in de toekomst hydrovoeten met elastisch vervormbare glijzolen toe te passen, worden de eisen aan de vlakheid van de glijbaan minder kritisch.

NIEUWE ONTWIKKELINGEN Momenteel wordt onderzoek verricht naar het elastisch gedrag van de hydrovoet en de glijbaan. Gestreefd wordt naar een glijzool die golvingen in de baan kan volgen, waardoor minder inspuitspunten per hydrovoet nodig zijn en tijdens de bouw minder hoge eisen aan de vlakheid gesteld hoeven te worden. Het elastisch volgen is vooral van belang in lengterichting van een langwerpige hydrovoet. Een langwerpige hydrovoet vereist een minder brede glijbaan, wat in een kostenreductie resulteert. Los van het elastisch volgen en de langwerpige vorm, wordt ernaar gestreefd het hydrosysteem te vereenvoudigen door met minder inspuitspunten te volstaan.

Met elastische loopvlakken resulteren contactkrachten in vervormingen, waardoor de glijzool zich kan aanpassen aan de vorm van de glijbaan. De contactkrachten blijven zeer beperkt, omdat relatief kleine vervormingen reeds voldoende zijn om de vorm van de glijbaan te volgen. Het streven is circa 90% van de belasting door de waterdruk te laten dragen. De resterende 10% van de belasting kan dan mechanisch worden gedragen en worden benut om de glijzool te vormen naar de glijbaan.

Als geringe contactkrachten worden toegestaan, hoeft bij scheefhellen van de deur de filmdruk niet meer in staat te zijn het elastisch scharnier te stellen. Dit kan immers door een lichtbelast randcontact worden geëffectueerd. In het ontwerp van de ronde hydrovoet - toegepast bij de Oranjesluizen, waar gestreefd werd naar een volledige waterfilm - waren meerdere kamers en een restrictie-unit nodig om scheefstand te compenseren. Met de nieuwe inzichten, waarbij licht belaste contactplaatsen worden benut om elastisch volgen te realiseren, kunnen de kamers en de restrictie-unit komen te vervallen. Het vervallen van de restrictie-unit betekent dat de volledige pompdruk als kamerdruk ter beschikking komt. Hierdoor kan met een circa 40% lagere pompdruk worden volstaan of kunnen de afmetingen van de hydrovoet kleiner worden gekozen.



Rechthoekige hydrovoet in de proefstand. De glijzool is minder dik dan bij de ronde hydrovoet, zodat elastische vervorming mogelijk is. In het midden van de glijvoet ontsnapt het water, terwijl aan de uiteinden contact is ontstaan. De contactkrachten blijven beperkt door de elasticiteit van de glijzool!

UREN WORDEN

MINUTEN

**Parallele simulatie van stroming
en transport in kustwateren**

22
E.A.H. Vollebregt
H. Jansen
M.R.T. Roest

• • •

Om veranderingen bij ingewikkelde situaties langs de kust te kunnen beoordelen waren fysische schaalmodellen lange tijd het enige hulpmiddel. Dankzij de computer worden deze modellen tegenwoordig meer en meer vervangen door hun wiskundige tegenhangers die veel snellere resultaten kunnen leveren. Computersimulaties van kust- en binnenwateren moeten echter aan steeds hogere eisen voldoen, ook omdat er steeds grotere economische belangen op het spel staan. Parallel rekenen maakt dat mogelijk. Door meerdere computers samen te laten werken aan een berekening, wordt een steeds hogere rekensnelheid bereikt. De TU Delft heeft op haar Cray T3E parallelle computer geëxperimenteerd met het simulatiemodel TRIWAQ van Rijkswaterstaat/RIKZ. Daarbij is een zes keer hogere rekensnelheid behaald dan tot nog toe mogelijk was. Kan nu blindelings op de sterk verbeterde rekentechniek worden afgegaan? En: zijn de schaalmodellen overbodig geworden?

• • •

Op 4 juli 1918 werd, bij Koninklijk Besluit, de 'Staatscommissie in zake hoge waterstanden in verband met de afsluiting van de Zuiderzee' ingesteld, met Hendrik Antoon Lorentz als voorzitter. Deze commissie had als doel nauwgezet en op wetenschappelijke basis te onderzoeken wat de gevolgen zouden zijn van de Afsluitdijk. Op deze manier zou zij een einde moeten maken aan de onzekerheden op dit punt.

Een gedetailleerd verslag van hoe Lorentz dit probleem te lijf ging, wordt gegeven in *Impressions of his life and works* (Amsterdam, 1957). Allereerst richtte hij zich op een vereenvoudigd model van de normale getijdebeweging. Dit model rekende hij door op de manier die toen gebruikelijk was, met een rekenliniaal. De uitkomsten werden onder andere getoetst voor de afsluiting van het Amsteldiep, tussen de Hollandse kust en het

eiland Wieringen. Zij bleken goed overeen te stemmen met de werkelijkheid. Gelijktijdig werden de berekeningen herhaald voor stormvloedsituaties. Hierbij voldeed het vereenvoudigde model niet meer. Voor het volledige model was het onmogelijk de uitkomst exact te berekenen. In plaats daarvan moest een zogenaamde numerieke rekenmethode worden gebruikt, waarmee de uitkomst zeer dicht kon benaderd. Dit werk kan nu worden herkend als het startpunt van een lange traditie van het gebruik van numerieke modellen voor waterbeweging in Nederland.

BESCHIKBAARHEID De door Lorentz geïntroduceerde rekentechnieken hebben ook elders in de wereld hun weg gevonden. Tot de dag van vandaag worden numerieke modellen - vaak in samenhang met fysische schaalmodellen - gebruikt voor het voorspellen van de waterbeweging. Het is overigens interessant te constateren dat het nog meer dan 25 jaar heeft geduurd na de instelling van de Staatscommissie-Lorentz, voordat vergelijkbare studies werden uitgevoerd voor het Deltagebied. Opvallend is dat in 1946 de toenmalige Stormvloedcommissie het initiatief nam voor de bouw van een schaalmodel, ondanks de beschikbaarheid van de rekentechnieken volgens Lorentz. Thijsse [1] geeft daarover een interessante beschouwing:

“De aanvankelijk door de Staatscommissie-Lorentz en daarna door de Rijkswaterstaat ontwikkelde rekenmethodes maken het mogelijk de noodzakelijke gegevens te verschaffen en men had hiermee al een aanvang gemaakt. Met succes was de bestaande toestand - toestand 0 - in het betrokken gebied nagerekend en ook voor een in de toekomst mogelijke situatie, na het leggen van een afsluitdam, waren reeds resultaten verkregen.

Het bezwaar van het uitvoeren van getijberekeningen is, dat het berekenen van een volgende situatie telkens bijna evenveel arbeid en tijd vergt als aan de voorgaande situatie was besteed.

In dit opzicht is het model in het voordeel. De eerste proef is uitermate tijdrovend en kostbaar: het model moet worden gebouwd, geoutilleerd en beproefd en vóór de eerste uitkomst is verkregen, is veel meer tijd verstreken en veel meer geld uitgegeven dan voor de berekening nodig zou zijn geweest. Daarna zijn de bordjes verhangen. Wil men de invloed van een afsluitdam nagaan, dan wordt een stuk triplex, in de juiste vorm gezaagd, in de rivier- of zeearm geplaatst. De naden worden gedicht met plasticine en de proef van zoëven - zonder de afsluitdam - wordt herhaald. Er is minder dan een dag mee gemoeid en ook als men ter wille van meerdere zekerheid de proef verscheidene malen herhaalt, is het in enige dagen bekeken.

Op grond van deze overwegingen vroeg - en kreeg - de directie Benedenrivieren van de Rijkswaterstaat machtiging, het Waterloopkundig Laboratorium te Delft op te dragen, het model te bouwen. De directeur van dat laboratorium - lid van de Stormvloedcommissie en schrijver van deze bijdrage - schatte, dat het model in een jaar kon worden gebouwd en dat met de bouw omstreeks vijftig duizend gulden zou zijn gemoeid.”

Dit model is eerst onder de naam M284, later als M600, vele jaren in gebruik gebleven als hulpmiddel bij ontwerp en uitvoering van de Deltawerken. Daarbij hebben zich spectaculaire veranderingen voorgedaan in de meet- en regelmethodes, waardoor de nauwkeurigheid van het schaalmodel aanzienlijk is verbeterd. Ook de ontwikkeling van de rekenmodellen stond echter niet stil. Met name dr. J.J. Dronkers leverde een belangrijke bijdrage door verdere studies naar de schematisering van de weerstandsterm en het invoeren van de Coriolis-versnelling. [2]

Toch bleef er behoefte bestaan aan snellere en eenvoudiger methoden om de vele



De strandpaal, een oud referentie- of meetpunt.

alternatieven door te rekenen die als mogelijkheid werden geopperd door de Stormvloedcommissie, die ruim voor de ramp van 1953 al overtuigd was van de noodzaak te komen tot een betere bescherming van Zuidwest-Nederland. Met name de in 1959 overleden dr.ir. J. van Veen heeft al in een zeer vroeg stadium (voor de Tweede Wereldoorlog) gewezen op de mogelijkheden te komen tot elektrisch analoge modellen ter versnelling van het onderzoek.

Zijn voorbereidend werk leidde tot de bouw van een elektrisch analogon voor het Deltagebied, de DELTAR. Dit model, hoewel nog niet geheel gereed, werd in mei 1962 ingezet als operationeel hulpmiddel bij de sluiting van de Grevelingen. Een dergelijk operationeel gebruik van een schaalmodel of numeriek model was in 1962 nog ondenkbaar. In het Driemaandelijks Bericht Deltawerken no. 18 van november 1961 wordt daarover geschreven: 'De verwachting is dat per dag gemiddeld vier getijberekeningen voor het gehele Deltagebied verwerkt kunnen worden. Een groep van vier rekenaars zou hiervoor met behulp van tafelrekenmachines verscheidene maanden nodig hebben.'

Bij de sluiting van het Brouwerswagense Gat (1971) is er sprake van operationele ondersteuning met drie hulpmiddelen, een speciaal gebouwd schaalmodel, de inmiddels voltooide DELTAR, en een numeriek model dat draait op een Elliott-rekenmachine, opgesteld op dezelfde plaats (Boorlaan in Den Haag) als het elektrisch analogon. In het Driemaandelijks Bericht no. 55 van februari 1971 wordt gemeld: 'De uitkomsten van het hydraulisch model zijn te vergelijken met de resultaten van een tweedimensionale getijberekening, terwijl die van de DELTAR en de computer een sterkere schematisering vertonen, gelijkend op de resultaten van een eendimensionale getijberekening.'

Een van de doelstellingen is na te gaan welke methode bij de uitvoering van de voorspellingen het meest effectief is, en met name het vlugst gegevens kan verstrekken die van belang zijn voor het plaatsen van de caissons. In een nabeschuiving geeft de Deltadienst in 1972 aan dat bij de dan bestaande stand van de computertechniek een



Meerkundige Dienst: Rijkswaterstaat, Delft

Maeslantkering, de stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg.

elektrisch analogon niet meer aan de orde zou zijn, en een hydraulisch schaalmodel zou slechts voor het bepalen van sommige details worden toegepast. Anderzijds komt men tot de conclusie dat de numerieke technieken nooit hadden kunnen worden ontwikkeld zonder de ervaringen met de beide andere hulpmiddelen.

COMPUTERMODELLEN Inmiddels is de situatie die Thijsse beschreef in 1946 radicaal gewijzigd. Lange tijd zijn de numerieke modellen naast de schaalmodellen gebruikt. De schaalmodellen hadden als voordeel dat zeer complexe situaties konden worden gemodelleerd en dat alle fysische processen in principe aanwezig zijn in het model. Door de toenemende snelheid van computers konden echter steeds gedetailleerdere numerieke modellen worden doorgerekend, waardoor dit voordeel steeds kleiner werd.

De computer heeft als groot voordeel zijn enorme flexibiliteit. In plaats van de maanden die nodig zijn voor de ontwikkeling van een schaalmodel, kunnen de eerste resultaten op de computer al na enkele dagen worden bekeken. Bovendien kan gemakkelijker worden gespeeld met parameters zoals bodemwrijving en windeffecten. Dit maakt dat de schaalmodellen heden ten dage nauwelijks meer worden gebruikt.

Ondanks de voordelen die numerieke modellen bieden, kunnen de schaalmodellen evenwel nog niet worden gemist. Dit geldt met name voor situaties waar geen sprake is van een homogene snelheidsverdeling, zoals bijvoorbeeld bij grote dichtheidsverschillen en gecompliceerde sedimentbeweging.

Tegenwoordig worden computermodellen ingezet bij een groot aantal beheers- en beleidsvraagstukken. Bij de Stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg bijvoorbeeld wordt een Beslissings Ondersteunend Systeem (BOS) gebruikt voor het automatisch sluiten van de kering. Dit BOS is gebaseerd op een model voor het voorspellen van de waterbeweging in de Noordzee. Het model geeft een schatting van de waterhoogtes tijdens een stormvloed, op basis van het astronomisch getij en een actuele weersvoorspelling.

Bij de beslissing over het wel of niet afsluiten van de stormvloedkering staan grote economische belangen op het spel. Afsluiting van de Nieuwe Waterweg betekent een schadepost van miljoenen gulden per dag voor de haven van Rotterdam. Daarom eisen de gebruikers van de haven dat de voorspellingen voldoende nauwkeurig zijn, zodat de kering alleen dan wordt afgesloten als er werkelijk gevaar voor overstroming bestaat.

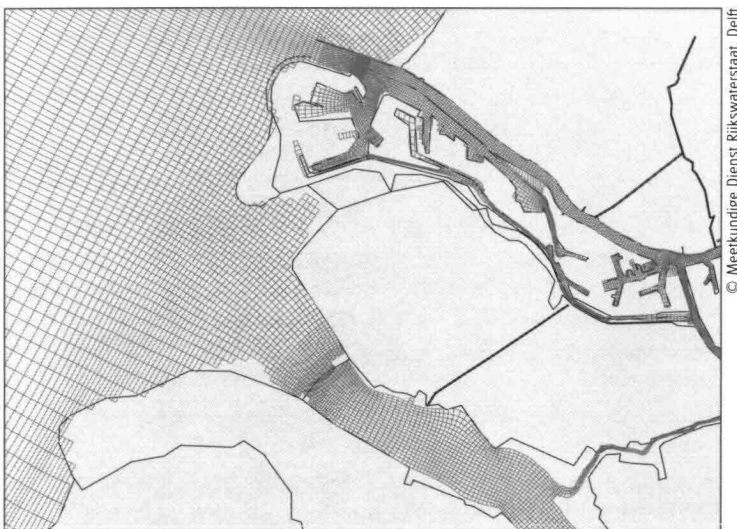
Een andere toepassing van computermodellen betreft de effecten die ontstaan door aanleg van de tweede Maasvlakte. Door verandering van het stromingspatroon zal de hoeveelheid zandafslag van de kust van Zuid-Holland groter worden. De mate waarin dit gebeurt, is van belang voor de keuze tussen de verschillende varianten en moet daarom van tevoren worden bepaald. Dezelfde problematiek speelt bij aanleg van nieuw land voor de kust van Scheveningen (plan-Waterman) en bij de ontwikkeling van een eiland voor een tweede nationale luchthaven (Schiphol in zee).

MODELLEREN VAN WATERBEWEGING

Het wiskundig model van de waterbeweging is al lange tijd bekend. De zogenaamde Navier-Stokes-vergelijkingen geven een goede beschrijving. Voor kustwateren kan een vereenvoudiging worden aangebracht, omdat de stroming voornamelijk in het horizontale vlak plaatsvindt. Immers, de diepte van kustwateren is zeer veel kleiner dan de lengte en breedte. Hierdoor kan de druk in het water bij benadering direct worden berekend uit de waterstand. Aan de andere kant moet er in kustwateren terdege rekening worden gehouden met een groot aantal voor ingenieurs belangrijke processen, zoals bodemwrijving, droogvallen en onderlopen, dichtheidsverschillen en dammen en sluisen.

Er zijn verschillende typen modellen te onderscheiden. Voor de afvoer van rivieren is het veelal voldoende een eendimensionaal model te gebruiken. Hierin wordt alleen gekeken naar de hoeveelheid water die per seconde door een bepaalde doorsnede stroomt, en niet naar de richting van de stroming.

Voor kustwateren en estuaria is het minimaal nodig een tweedimensionaal model te gebruiken, om ook de (horizontale) richting van de stroming in het model te kunnen meenemen. De waterhoogte voorspelling aan de Nederlandse kust kan met zo'n 2D-model vrij aardig gedaan worden. In driedimensionale modellen ten slotte kan ook verticale stroming worden berekend en kunnen situaties worden gemodelleerd waarbij het water op verschillende dieptes andere snelheden heeft. Zo kan het water bij de bodem vrijwel stilstaan, terwijl er bij het oppervlak hevige golven plaatsvinden. De effecten hiervan zijn bijvoorbeeld belangrijk bij het modelleren van zoutindringing in het Haringvliet.



© Meetkundige Dienst Rijkswaterstaat, Delft

FIGUUR 1: Deel van een rekenrooster voor het Rijn-Maasmondgebied.

De dichtheidsverschillen die hierbij optreden, zorgen namelijk voor gelaagdheid, menging en verticale stroming die in tweedimensionale modellen niet kan worden weergegeven.

Voor het doorrekenen (simuleren) van de modellen wordt het wateroppervlak overdekt met een rekenrooster, ofwel opgedeeld in vakjes (figuur 1). Per vakje wordt een soort gemiddelde waterstand en stroomsnelheid aangehouden. Hoe kleiner het vakje is, hoe nauwkeuriger deze gemiddelden overeenkomen met de werkelijke waarden.

In het TRIWAQ-pakket van Rijkswaterstaat/RIKZ is het mogelijk om een kromlijng rooster te gebruiken, waardoor de afmetingen van de vakken niet op iedere plaats even groot hoeven te zijn. Op deze manier kan op plaatsen waar een complexer stroombeeld wordt verwacht, hogere resolutie worden verkregen. Ook kan hierdoor de kustlijn beter worden benaderd. In de simulatie worden al gauw zo'n 20.000 vakken gebruikt en worden voor ieder van de vakjes zo om de paar minuten lokale waterstanden en stroomsnelheden berekend.

Het simuleren van de modellen dagen kan hierdoor op krachtige werkstations dagen rekenwerk vergen. De beschikbare rekenkracht vormt een belemmering voor toepassing van de simulatiemodellen.

MODELLEREN VAN EROESIEGEDRAG Een andere belangrijke verantwoordelijkheid van Rijkswaterstaat is het in stand houden van een betrouwbare kustverdediging. Al jaren wordt observatie gemaakt van en onderzoek gedaan naar het verloop van kusterosieprocessen, om meer begrip en inzicht te krijgen. Sinds 1850 bijvoorbeeld worden jaarlijks metingen gedaan aan het gemiddeld hoog- en laagwater en aan de ligging van de kustlijn, met behulp strandpalen, die samen de Rijks Strand Palenlijn (RSP) vormen. Loodrecht op de RSP is een meetnet gekozen voor het doen van dieptemetingen tot op 800 meter in zee. Deze metingen worden ieder jaar na het stormseizoen uitgevoerd en zijn sinds 1963 beschikbaar op nagenoeg hetzelfde meetrooster. Deze enorme hoeveelheid gegevens vormt de JARKUS-database: de JAarlijkse KUSmetingen.

Het erosiegedrag is het resultaat van een complex dynamisch proces dat op verschillende tijds- en ruimteschalen plaatsvindt. Dit proces omvat onder andere golfslag, stroming en transportverschijnselen en interacties met de veranderende bodemtopografie. De invoer voor dit systeem is sterk afhankelijk van het weer en daarom niet in deterministische zin voorspelbaar op de langere termijn. Wel kan worden gezocht naar eventuele trends of ander voorspelbaar gedrag op een schaal van tientallen jaren, omdat de erosie dan de som is van de reacties op een groot aantal verschillende weersomstandigheden.

De modellering van erosiegedrag op deze lange termijn is niet goed mogelijk met behulp van een fysische beschrijving van de onderliggende processen. Ten eerste omdat het ons ontbreekt aan voldoende rekenkracht. Belangrijker is dat het niet duidelijk is of de fysische beschrijving alle relevante aspecten voor erosie omvat. Dit komt doordat de meeste fysische effecten over een langere periode geen significante bijdrage leveren. Daardoor wordt het erosiegedrag waarschijnlijk met name bepaald door zwakkere resteffecten die door de kortere-termijnmodellen niet goed worden weergegeven.

Een interessante oplossing voor dit modelleringsprobleem is het samenvoegen van modellen en data. Zo'n aanpak bestaat uit het beschrijven van het morphodynamisch proces als een som van tijdsafhankelijke geometrische patronen (**Principal Oscillation**

PARALLEL REKENEN

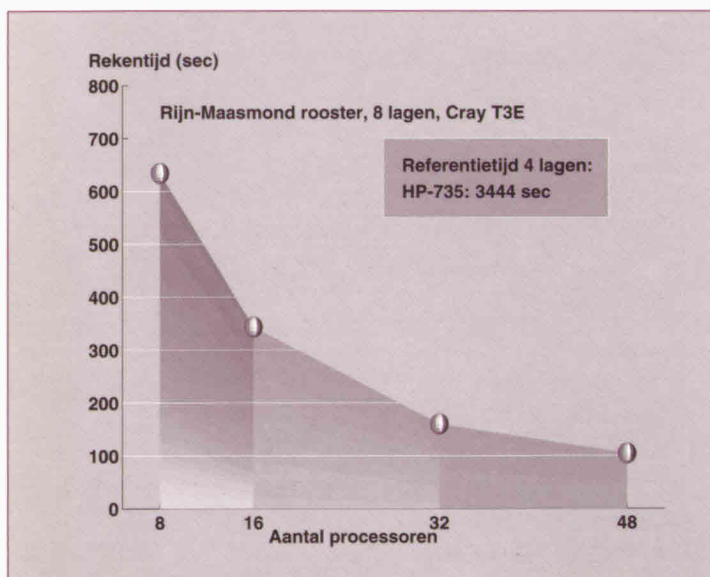
Zowel bij de traditionele aanpak voor waterbeweging als bij de nieuwe aanpak voor het erosieprobleem vormt de hoeveelheid rekenwerk een beperking voor de toepasbaarheid van de modellen. Om een grotere rekensnelheid te bereiken, is het mogelijk om meerdere computers te laten samenwerken aan een enkele berekening. Dit staat bekend als parallel rekenen.

Als meerdere verwerkingseenheden (processors) in een computer zijn geïntegreerd, spreken we van een parallelle computer. Dit type computer is het snelste dat op dit moment beschikbaar is. Eind 1996 heeft de TU Delft zo'n computer aangeschaft: een Cray T3E met (nu) 80 processoren.

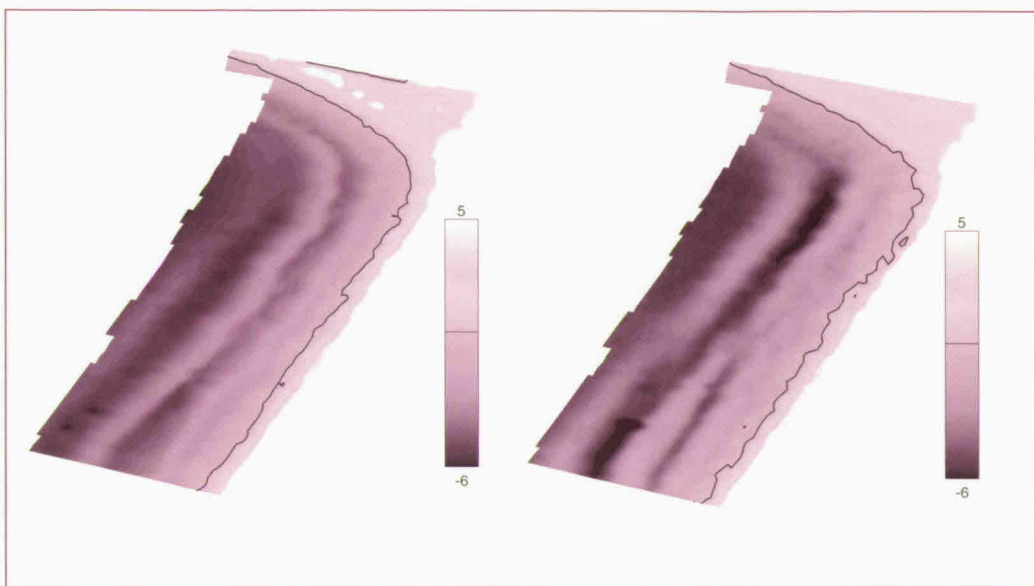
De afgelopen jaren is bij de groep Parallele Algoritmiek van de TU Delft onderzoek gedaan naar rekenmethoden en programmatuur, waarmee effectief gebruik kan worden gemaakt van parallel rekenen voor de modellen van Rijkswaterstaat. Voor een van de modellen (Rijn-Maasmondgebied, 22.138 roosterpunten horizontaal, 4 of 8 lagen) is de rekentijd teruggebracht met een factor 60 op 48 van de processoren van de Cray (figuur 3). Waar vroeger een uur rekentijd nodig was voor het doorrekenen per uur gesimuleerde tijd voor het model met 4 lagen (HP 9000/735 werkstation), is nu nog krap twee minuten nodig voor het model met 8 lagen. Door deze versnelling zijn nieuwe toepassingen van computersimulatie haalbaar geworden.

Een moeilijkheid bij het gebruiken van parallelle computers is dat ze speciale programma's vereisen en dat het programmeren hiervan complexer is dan voor traditionele (sequentiële) computers. Dit is, omdat de berekening moet worden opgedeeld in min of meer onafhankelijke stukken, en omdat tussenresultaten moeten worden uitgewisseld tussen de processoren. De programmeur moet rekening houden met het samenwerken van verschillende programma's, iets wat normaal gesproken niet nodig is. Dit is met name een probleem voor uitgebreide en ingewikkelde rekenprogramma's, zoals het programma TRIWAQ van Rijkswaterstaat.

Een opdeling van het rekenwerk voor TRIWAQ wordt verkregen door de schaar te zetten in het rekenrooster. Elk stuk wordt later door een aparte computer doorgerekend. Het



FIGUUR 3: Rekentijd voor simulatie van een uur echte tijd voor het Rijn-Maasmondgebied.



FIGUUR 2: Zeebodem, IJmuiden-Katwijk 1996.

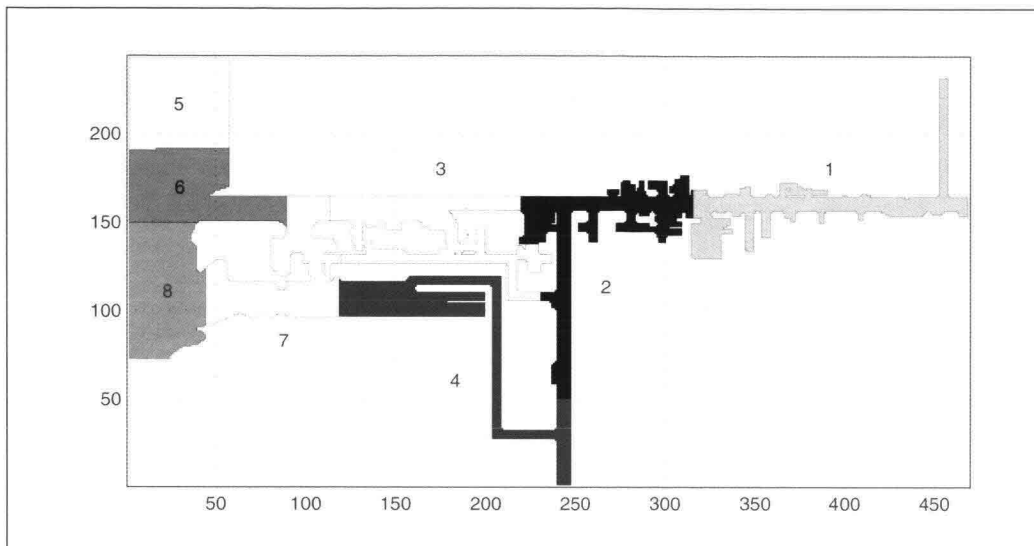
Patterns, POP's), elk vermenigvuldigd met een tijdsafhankelijke amplitude. De amplitudes kunnen dan worden geschat uit de aanwezige meetgegevens. Extrapolatie van de tijdreeksen levert dan een voorspelling van het zeebodemprofiel voor opeenvolgende jaren, zie figuur .

Dergelijke voorspellingen kunnen natuurlijk alleen gemaakt worden voor een eindig aantal jaren - het doel is dit aantal te maximaliseren. De voorspelkracht hangt in het algemeen af van de volgende factoren:

- de kwaliteit (tijdsduur, interval en nauwkeurigheid) van de metingen;
- de juistheid van het voorgestelde model (POP);
- de nauwkeurigheid van de toegepaste modelreductie (compressie van de meetgegevens);
- de geschiktheid van de toegepaste identificatieprocedure;
- de complexiteit van het onderliggende (morphodynamische) proces.

Met uitzondering van het eerste, geven al deze aspecten ruime aanleiding tot vervolgonderzoek. Door het grote aantal simultane metingen per tijdstip (2600/jaar in het geval van figuur 2 is het momenteel nodig om de gegevens voor te bewerken voor de statistische analyse. Dit voorbereiden bestaat uit het comprimeren van de gegevens en moet zodanig worden gedaan, dat zoveel mogelijk significante informatie behouden blijft. Daarna moeten de geometrische patronen en bijbehorende amplitudes worden geïdentificeerd.

Een algemene procedure hiervoor bestaat uit het gelijktijdig schatten van deze twee grootheden uit de gegeven tijdreeksen. Deze aanpak leidt echter in het algemeen tot een ingewikkeld, niet-lineair numeriek probleem. Daarom zijn er ook (minder nauwkeurige) procedures, waarin eerst de POPs en daarna de amplitudes worden geschat. Tenslotte zijn er ook modellen mogelijk die beter aansluiten bij de niet-lineariteit van het morphodynamische proces. Nieuwe inzichten die worden verkregen over dit proces, kunnen worden gebruikt voor verbetering van de identificatie-procedure.



FIGUUR 4: De schaar in het rekenrooster voor het Rijn-Maasmond Gebied.

opknippen mag echter niet willekeurig worden gedaan, want elk stuk moet ongeveer dezelfde hoeveelheid punten bevatten en de lengte van de knippen moet zo klein mogelijk zijn.

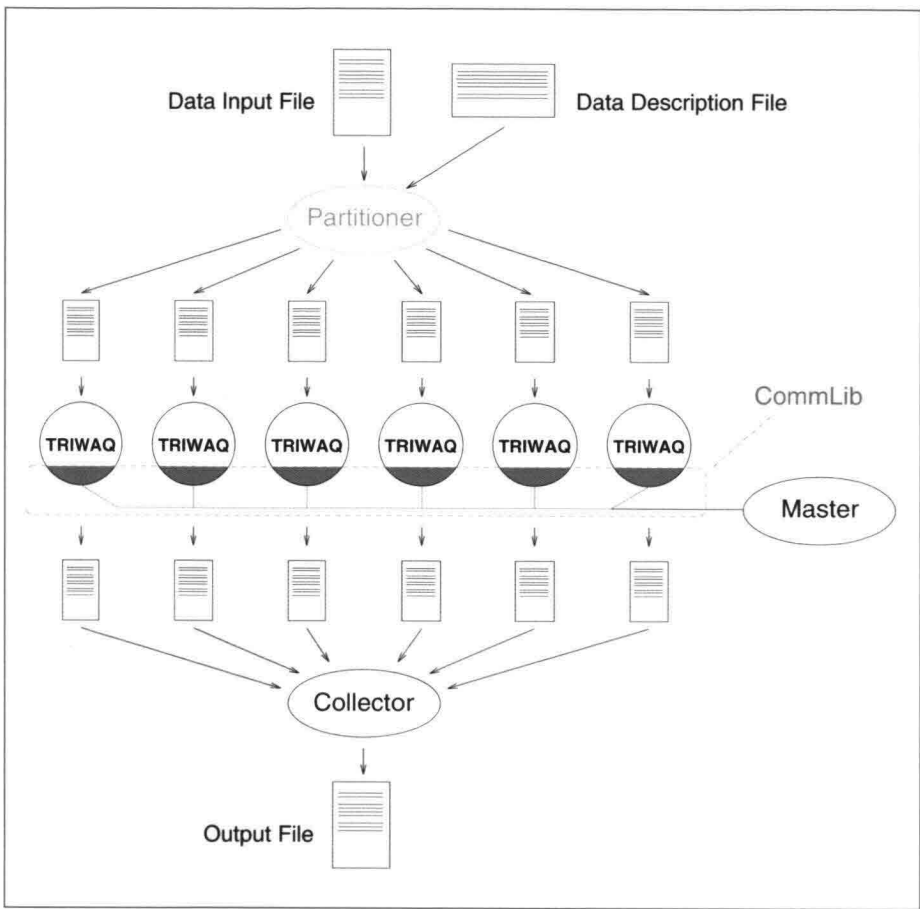
Dit laatste is omdat de hoeveelheid gegevens die moet worden overgedragen van de ene processor naar de andere, direct samenhangt met de lengte van de knip. Er zijn pakketten op de markt die automatisch een gunstige opknipping bepalen, maar die blijken voor het Rijn-Maasmondmodel een niet-optimale verdeling op te leveren. Met wat gepuzzel kan de verdeling met de hand verbeterd worden, zie figuur 4. Deze verdeling is vervolgens ingebracht in ons partitioneringspakket, de **Partitioner**.

De **Partitioner** zorgt ervoor dat elke computer de invoergegevens krijgt die voor zijn stuk van het rooster van belang zijn. Deze op zich complexe taak kon op een zeer generieke en elegante manier worden opgelost door de samenhang van de verschillende gegevensstructuren te beschrijven.

Na de partitioneringsfase wordt op ieder van de processoren van de parallelle computer een kopie van het TRIWAQ-programma opgestart, ieder met zijn eigen deelmodel. Bij het doorrekenen van deze deelmodellen wisselen de processoren informatie uit over de randen tussen hun domeinen. Hierdoor blijven de processoren met elkaar in de pas lopen. Wanneer ze allemaal klaar zijn, worden de resultaten verzameld en met elkaar geïntegreerd. Deze functie wordt verzorgd door de **Collector**, die zo'n beetje het spiegelbeeld is van de **Partitioner**.

SAMENHANG TUSSEN DE VERSCHILLENDE MODULES IN PARALLEL TRIWAQ.

Hoe eenvoudig de principes van parallel TRIWAQ ook mogen lijken, het is bij een complex programma zoals TRIWAQ bijzonder lastig om alles goed te implementeren. Dit geldt des te meer omdat bij parallel rekenen meerdere computers tegelijk opereren, waardoor de oorzaak van fouten lastig is op te sporen. Bij het ontwikkelen van parallel TRIWAQ is daarom veel aandacht besteed aan het ontwikkelen van nieuwe programmeertechnieken. We hebben een methode ontwikkeld die precies beschrijft welke tus-



FIGUUR 5: Samenhang tussen de verschillende modules in parallel TRIWAQ.

senresultaten moeten worden uitgewisseld tussen de processoren, hetgeen het programmeren veel eenvoudiger maakt. Verder hebben we een nieuw gezichtspunt gekozen voor de parallelle berekening. In plaats van het probleem te zien als een grote berekening die is opgedeeld in stukken, beschouwen wij het als een aantal berekeningen die samen een groter geheel vormen. Hierdoor hebben we een programma kunnen ontwikkelen dat zowel op parallelle als op traditionele (sequentiële) computers kan worden gebruikt. Dit betekent dat er niet twee verschillende versies van het programma moeten worden onderhouden, wat tot onaanvaardbare onderhoudskosten zou leiden. Bovendien blijken de technieken die zijn ontwikkeld voor parallel rekenen, nu ook te gebruiken voor het koppelen van verschillende simulatieprogramma's, bijvoorbeeld voor stroming en zandtransport. Een dergelijke koppeling leidt tot een grotere modelleerflexibiliteit, zonder dat daarvoor veel nieuwe programmatuur nodig is.

TENSLOTTE Parallel rekenen maakt het mogelijk om de steeds groter en ingewikkelder wordende modellen door te rekenen, die voor het beheer van de kust en binnenwateren nodig zijn. In theorie kan een steeds hogere rekensnelheid behaald worden door steeds meer processoren in te zetten. Omgekeerd zorgt het beschikbaar worden van hoge rekensnelheid ervoor dat onderzoekers de modellen op een nieuwe manier gaan gebruiken: nu rekensnelheid geen probleem meer is, kunnen berekenin-

gen worden uitgevoerd die tot nu toe niet mogelijk waren. Hiermee openen zich nieuwe perspectieven voor het gebruik van computermodellen, met nauwkeurigheden die ondenkbaar waren toen Lorentz in 1921 met z'n rekenlineaal aan het schuiven was. Maar ondanks de sterk verbeterde rekentechniek kan nog niet blindelings op de uitkomsten worden afgegaan. Schaalmodellen blijven voorlopig nodig om de waarde van de verschillende coëfficiënten af te schatten, en waarnemingen in prototype blijven nodig. Enerzijds om de randvoorwaarden te bepalen, anderzijds om toch telkens de numerieke modellen te ijken en bij te stellen.

NOTEN

- 1 Prof.ir. J. Th. Thijsse, 'Het Deltamodel in het Waterloopkundig Laboratorium te Delft' in: Rapport Deltacommissie, deel 5. Staatsdrukkerij en Uitgeverijbedrijf Den Haag, 1961.
- 2 Dr. J.J. Dronkers, 'De invloed van de Deltawerken op de getijbeweging en de stormvloedstanden langs de kust van Zuidwest-Nederland' in: Rapport Deltacommissie, deel 5. Staatsdrukkerij en Uitgeverijbedrijf Den Haag, 1961.

EEN KWESTIE VAN
SCHUIVEN

Automatisering van het peilbeheer
in de Maas

23
R. Brouwer
A. Hof
J. Schuurmans

• • •

Verschuivingen van de vele belangen bij de Maas zullen leiden tot een ander peilbeheer van deze rivier. Dat andere beheer moet worden gerealiseerd met schuiven. Nieuwe ontwikkelingen, zoals de groei van het scheepvaartverkeer, de natuurontwikkeling en de bescherming tegen hoog water, maken het noodzakelijk dat het waterpeil van de Maas voortaan automatisch wordt bestuurd - zodat er steeds voldoende diepgang is. In opdracht van Rijkswaterstaat heeft de TU Delft voor zo'n operationeel beheerssysteem een besturingssysteem ontworpen, dat de zes stuwen in de rivier manipuleert. Een toelichting bij een systeem, dat zo degelijk is dat het ook toekomstige wijzigingen in de Maas aankan.

• • •

In het verleden was de aandacht voor de Maas vooral geconcentreerd op het realiseren van massatransport per schip. Daarbij ging het met name om het vervoer van steenkool van de Limburgse mijnen naar andere delen van Nederland. De overstromingen van 1926 leidden tot een verbetering van de beheerssituatie tussen Grave en Lith. In de jaren tachtig en negentig van deze eeuw stelt de samenleving nieuwe, hogere eisen aan de scheepvaart, de natuurontwikkeling en aan de hoogwaterbescherming. Regering en parlement hebben hiertoe strategische beslissingen genomen. Tot de uitvoering van een van deze besluiten behoort de automatisering van het peilbeheer.

ACHTERGRONDEN De Maas zorgt al eeuwen voor de afvoer van water, ijs en sediment. De langaanhoudende perioden van lage afvoeren waren een belemmering voor de scheepvaart. Vandaar dat Koning Willem I de Zuid-Willemsvaart liet graven om Noord-Nederlandse en nu Belgische gebieden met elkaar te verbinden. De scheiding van Nederland en België heeft de uitbouw van de Maas als internationale scheepvaartverbinding vertraagd. Maar in deze eeuw werd de Maas toch een belangrijke scheepvaartverbinding. Het vervoer van steenkool uit de Zuid-Limburgse mijnen vereiste een infrastructuur die geschikt was voor de meest geëigende massatransportmiddelen, in

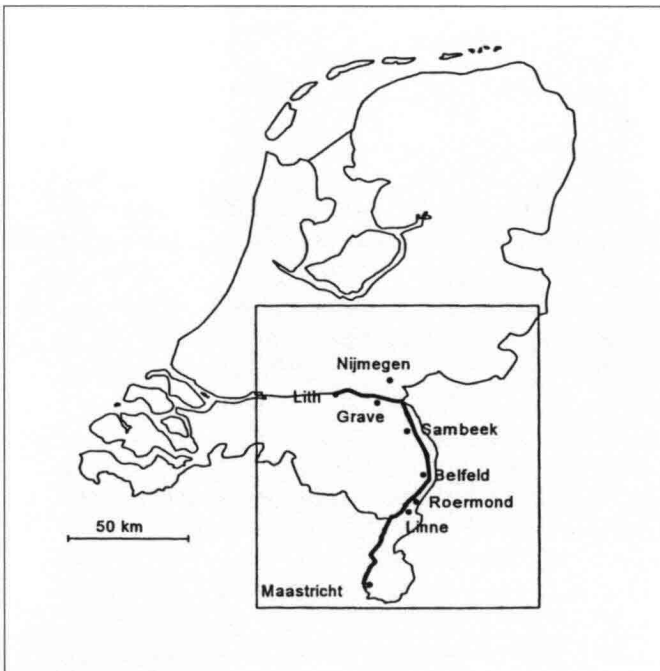
casu schepen met een groot laadvermogen. Dit is de reden waarom de Maas van Linne tot Grave in de jaren twintig werd gekanaliseerd. De Maas kreeg via het Maas-Waalkanaal verbinding met de Rijn en West-Europese waterwegen. De ramp van 1926 noodzaakte tot vergroting van de afvoercapaciteit tussen Grave en Lith, om het overstromingsrisico af te kunnen stemmen op andere delen van het rivierengebied. De stuw te Lith ondervangt de verdroging van (landbouw)gronden en zorgt voor de gewenste vaardiepte tussen beide plaatsen.

De handbediende schuiven in de stuwen van Borgharen tot Lith zorgen voor de gewenste, actuele waterstanden. Dat is een heel geregeld. Behalve de scheepvaart en landbouw stellen ook de bij de stuwen aangebrachte waterkrachtcentrales hun eisen.

In de jaren tachtig en negentig van deze eeuw kwamen drie ontwikkelingen op gang, die verstrekende gevolgen voor de Maas zouden hebben. De uit de jaren twintig daterende condities voor de scheepvaart blijken ontoereikend om gelijke tred te kunnen houden met het verkeer op de Rijn en andere Europese waterwegen. Met name een grotere vaardiepte is daarbij van belang. Daarnaast is de Maas ook een belangrijk element in de ecologische hoofdstructuur. Vooral het met België gemeenschappelijke Maastraject, de Grensmaas, bezit sterke potenties om in belangrijke mate bij te dragen aan de door het Wereld Natuur Fonds gepropageerde, meer natuurlijke ontwikkeling. Ten slotte hebben de hoogwaters van 1993 en 1995 geleid tot het overdenken van de hoogwaterbeschermingsstrategie.

Kortom, (ver)schuivingen in de vigerende Maasproblematiek.

Die verschuivingen hebben hun neerslag gevonden in strategische beleidsbeslissingen MOMARO (MODernisering van de MAasROute), de Grensmaas en de Zandmaas. Voor het adequaat toepassen van deze beleidsbeslissingen in het operationele beheer van alledag is automatisering van het peilbeheer op de Maas zeer gewenst. De TU Delft heeft



De loop van de Maas.



Het stuwcomplex Sambeek.

voor Rijkswaterstaat een onderzoek uitgevoerd naar mogelijkheden om het peilbeheer in de Maas, tussen Linne en Lith, te automatiseren. Doel van dit onderzoek was om de rekenregels te ontwerpen voor een operationeel beheerssysteem, dat de zes stuwen op dit traject optimaal bestuurt.

OPERATIONEEL BEHEERSSYSTEEM Tijdens hoge Maasafvoeren zijn alle stuwen gestreken. Maar tijdens midden en lage afvoeren moet met behulp van de stuwen voldoende diepgang voor de scheepvaart worden gegarandeerd. Om de capaciteit van de scheepvaart groter te kunnen maken, is het van wezenlijk belang deze diepgang te vergroten. Deze grotere diepgang levert met name bij de benedenhoofden van de sommige sluizen problemen op. Dit kan worden verholpen door in de betreffende panden van de Maas de waterstanden te verhogen. Een continue verhoging van de waterstanden is echter niet noodzakelijk. Immers, alleen bij de benedenhoofden van de sluizen, dus bovenin het stuwpaand, is de huidige waterstand te laag. Deze situatie treedt alleen op bij lage afvoeren. Bij lage afvoeren is het verhang gering en is de waterstand bovenin het stuwpaand bijna gelijk aan die beneden in het stuwpaand. Het is dus voor de diepgangvergroting voldoende om bij lage afvoeren een (verhoogd) streefpeil bovenin het stuwpaand te handhaven, en bij grotere afvoeren over te gaan op de huidige wijze van stuwen. Deze manier van stuwen wordt dynamisch stuwen genoemd, en zal naar verwachting in een aantal panden worden ingevoerd. Het handhaven van een streefpeil bovenin het stuwpaand vraagt om frequente en nauwkeurige aanpassingen in de stuwstand, die alleen bij automatisering van het stuwbeheer relatief eenvoudig zijn te verwezenlijken.

Voor de automatisering van de peilhandhaving is gekozen voor een regelstructuur zoals die in de meet- en regeltechniek veel wordt gebruikt, namelijk een combinatie van een



Poirée-schotten in het stuwcomplex Sambeek.

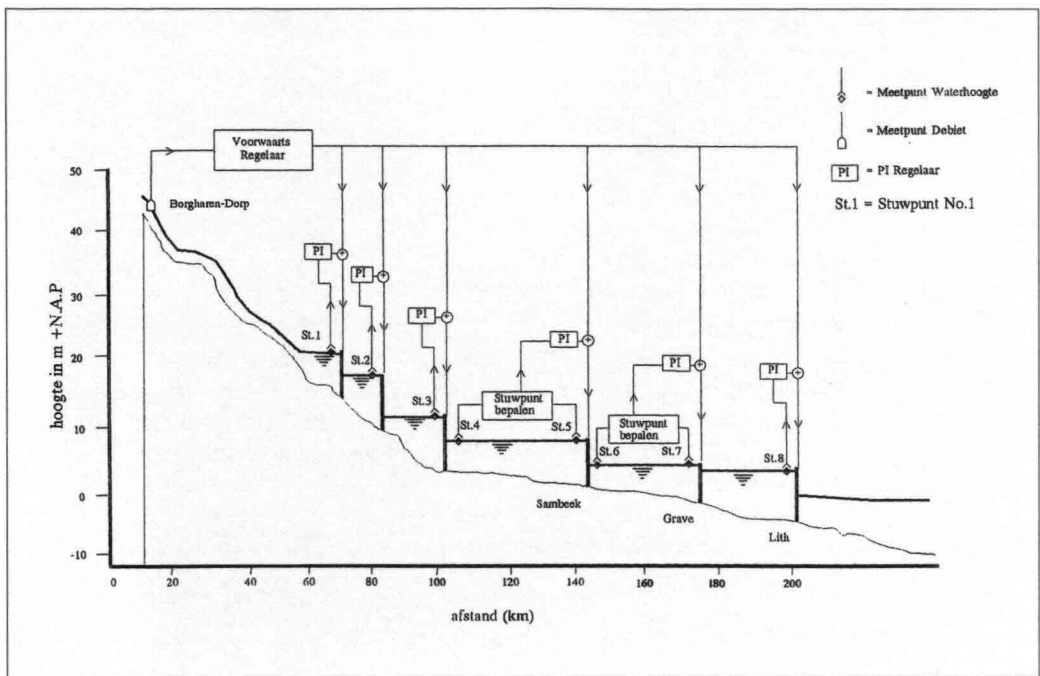
terugkoppelingsregeling en een voorwaartsregeling. Deze regelstructuur maakt een degelijke en inzichtelijke regeling van de peilen mogelijk. De principes van de terugkoppeling en de voorwaartsregelaar worden hierna kort toegelicht.

Bij de terugkoppeling wordt, op de plaats waar het streefpeil moet worden gehandhaafd, het verschil bepaald tussen het streefpeil en de gemeten waterstand. Uit het verschil berekent de terugkoppelingsregelaar een stuursignaal dat wordt doorgegeven aan de stuw. Daardoor wordt de stand van de stuw bijgesteld en zal de waterstand zich richting het streefpeil gaan bewegen. Een nadeel van terugkoppeling is dat er enigszins achter de feiten aan wordt gelopen. Het regelsysteem komt pas in actie als er een meetbare afwijking van het streefpeil is ontstaan. Het gebruik van een terugkoppelingsregelaar blijkt desondanks tot een redelijke peilhandhaving te kunnen leiden.

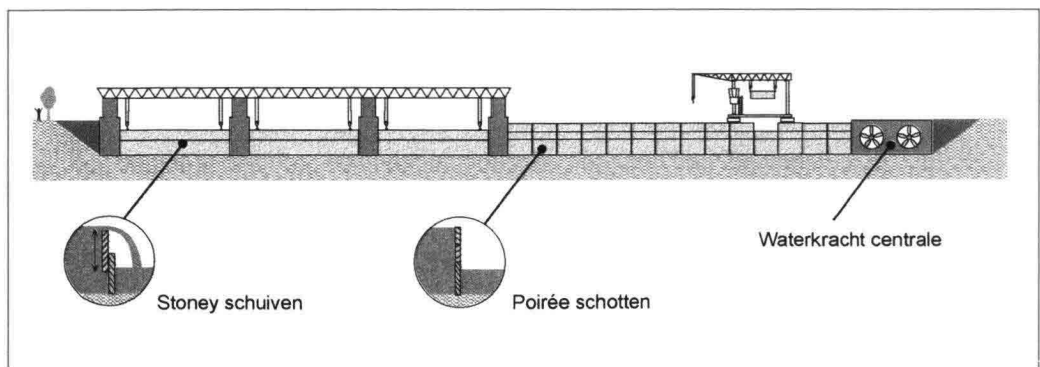
Door een voorwaartsregelaar toe te voegen kunnen de waterstanden nauwkeuriger worden gehandhaafd. Hiertoe wordt gebruik gemaakt van het meetpunt Borgharen-Dorp, waar de afvoer wordt gemeten. De voorwaartsregelaar berekent aan de hand van deze afvoermeting hoe op de verschillende stuwpunten de waterstanden worden verstoord. Voor elke stuw wordt een voorwaartsregel-signaal berekend dat deze verstoring compenseert.

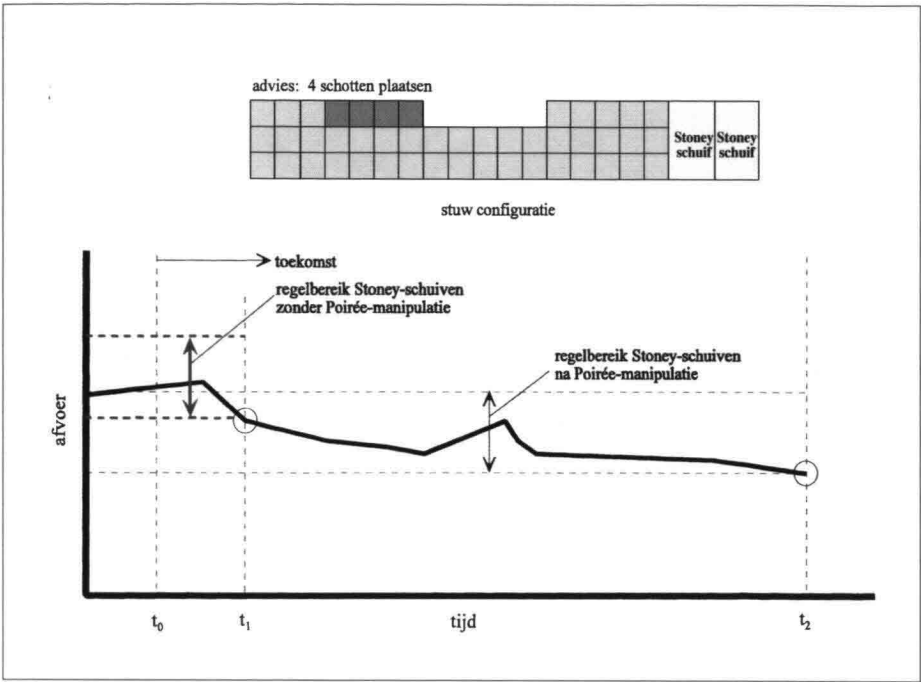
De stuursignalen van de terugkoppelingsregelaar en de voorwaartsregelaar kunnen simpelweg bij elkaar worden opgeteld, en leveren dan het totale stuursignaal dat aan de stuw wordt doorgegeven.

SCHUIVEN MET SCHOTTEN Vier van de zes stuwen in het project zijn niet volledig te automatiseren. Behalve automatiseerbare delen, bestaande uit zogenaamde Stonyschuiten, kennen deze vier stuwen een zogenaamd Poirée-gedeelte. Dit Poirée-gedeel-

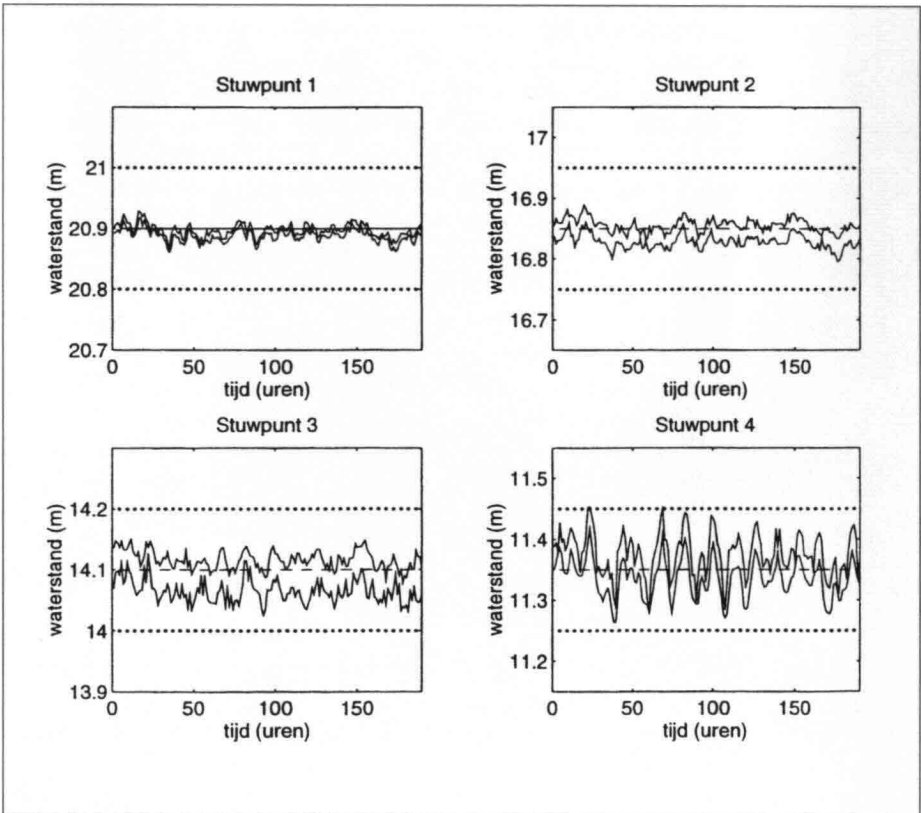


te bestaat uit drie rijen schotten, die rusten op een drempel en steunen in een stelling die ook dienst doet als loopbrug. Door het verwijderen en plaatsen van schotten kan de waterstand stroomopwaarts worden beïnvloed. Het plaatsen of verwijderen van schotten gebeurt met behulp van een hijskraan die over een rails op de brug kan rijden. Het verwijderen van de schotten is arbeidsintensief en een onaangename bezigheid. Het is dan ook gewenst dat in de toekomst het manipuleren van deze Poirée-schotten zo min mogelijk hoeft plaats te vinden en indien noodzakelijk, bij voorkeur overdag. De regeling voor de peilhandhaving met terugkoppeling en voorwaartsregeling heeft betrekking op de Stoney-schuiven. Daarnaast wordt het operationeel beheersstelsel uitgerust met een module die het beheer (plaatsen en verwijderen) van de Poirée-schotten aangeeft.





Poirée-manipulaties.



Simulaties met computermodel.

De Stoney-schuiven hebben een begrensd regelbereik. Als de Stoney-schuif in zijn uiterste stand dreigt te komen (helemaal open of helemaal dicht), is het noodzakelijk om ook de Poirée-schotten te manipuleren. Hierdoor krijgen de schuiven weer voldoende bewegingsvrijheid.

Aan de hand van het gemeten afvoer bij Borgharen-Dorp wordt door de module een voorspelling gemaakt van de afvoer bij elke stuw. Daarmee kan een optimale Poirée-manipulatie worden berekend, waardoor het moment van de volgende manipulatie zo ver mogelijk in de toekomst komt te liggen.

De automatische delen van de stuw kunnen op elk moment van de dag hun regelbegrenzing naderen. Om te vermijden dat op ongunstige tijdstippen een Poirée-manipulatie moet plaatsvinden, is het mogelijk om op elk gewenst moment de optimale Poirée-manipulatie te berekenen. De sluismeester kan bijvoorbeeld op het eind van de dag een nieuwe Poirée-instelling bepalen, waarmee vermeden wordt dat het Poirée-gedeelte 's nachts moet worden bijgesteld.

Het veranderen van de instelling van de Poirée-schotten zal een variatie in de afvoer veroorzaken. Een schot levert een variatie op van circa $15\text{m}^3/\text{s}$. Omdat het verplaatsen van de schotten zo arbeidsintensief is, wordt dit zo min mogelijk gedaan. Als de schotten eenmaal verplaatst moeten worden, worden er bij voorkeur zo veel mogelijk tegelijk verplaatst. De veranderingen in de afvoer kunnen hierdoor oplopen tot $100\text{m}^3/\text{s}$. Onder normale omstandigheden kunnen de regelaars uit het besturingssysteem de waterstand binnen de opgelegde marges houden. Onder extreme condities, zoals erg lage afvoeren, kunnen de toegestane marges worden overschreden. Om dit te vermijden is een voorwaartsregeling ontworpen die op de Poirée-manipulaties anticipeert. Zodra er een schot wordt geplaatst of verwijderd, zorgt de voorwaartsregelaar voor een compenserende actie van de Stoney-schuif, zodat de afvoer ter plaatse van de stuw niet verandert.

COMPUTERMODEL Het operationeel beheerssysteem is ontwikkeld met gebruikmaking van een computermodel. Dit hydrodynamische model is gemaakt met behulp van het door de TU Delft bij de sectie Land- en Waterbeheer ontwikkelde modelleringspakket MODIS. Met dit pakket is het mogelijk om interactieve besturingssystemen in een dynamisch watersysteem te simuleren. In dit computermodel van de Maas zijn de stuw- en schotstructuren nauwkeurig gemodelleerd. Daarnaast is het complete operationeel beheerssysteem geprogrammeerd zoals dat is ontworpen. De optimale instellingen van de regelaars zijn met behulp van simulaties bepaald.

Met door Rijkswaterstaat geselecteerde afvoerverlopen is het operationeel beheerssysteem, onder extreme condities, getest. Uit deze testen is geconcludeerd dat de ontworpen automatisering voldoet aan alle eisen en wensen met betrekking tot het toekomstige peilbeheer op de Maas. Behalve de testen is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd, waaruit is gebleken dat de gekozen structuur van een terugkoppelingsregelaar en een voorwaartsregelaar zeer degelijk is.

TENSLOTTE: IMPLEMENTATIE Voor de implementatie van de hardware van het operationeel beheerssysteem is een hiërarchische structuur gepland, met in Heel een centrale unit en op elke stuw een lokaal onderstation. Op de lokale onderstations wordt de lokale informatie (waterstanden, stuwinstelling) verzameld en worden berekeningen uitgevoerd. Voorgesteld is dat vanuit de centrale unit in Heel de voorwaartsregeling wordt verzorgd, en dat Heel beschikt over alle informatie (waterstanden, gemeten



Stuwcomplex Linne.

afvoeren, stuw instellingen). Vanuit de centrale unit kunnen, indien nodig, de parameters in de regelingen op de lokale onderstations worden aangepast.

De kosten voor aanschaf van de benodigde hardware, de installatiekosten en de verdere ontwikkelingskosten voor het operationeel beheerssysteem worden globaal geschat op 2.3 miljoen gulden (prijspeil 1995).

Voor verwezenlijking van de grotere diepgang zijn, behalve automatisering van de stuw, ook andere maatregelen noodzakelijk. De stuw, waarbij dynamisch gestuurd gaat worden, moeten worden verhoogd ten behoeve van de peilhandhaving bij lage afvoeren. Om het aantal Poirée-manipulaties te verminderen zal bij tijd en wijle een groter gedeelte van de afvoer via het Poirée-gedeelte geleid worden dan thans het geval is, waardoor ter plaatse de stroomsnelheden zullen toenemen. Om de bestortingen benedenstrooms van de stuw, hiertegen weerstand te kunnen laten bieden, zijn deze versterkt.

Het is mogelijk dat de dimensies van de Maas waarin het operationeel beheerssysteem uiteindelijk zal gaan werken, door toekomstige plaatselijke verdiepingen of verbredingen enigszins zullen afwijken van die waarop nu het operationele beheerssysteem is ontwikkeld en getest. Het systeem is echter dermate degelijk dat de aanpassingen niet zullen leiden tot een verandering in de prestaties van de ontworpen regelingen. Met het reeds ontwikkelde hydrodynamische model kan de besturing, indien nodig, relatief snel en eenvoudig worden aangepast.

ENERGIE DOOR VERGISTING
VAN **SLIB**

**Nieuwe systemen voor het eenvoudiger
zuiveren van afvalwater**

24
Mike S.M. Jetten
Mark C.M. van Loosdrecht



Twee nieuwe systemen, die afzonderlijk en gecombineerd kunnen worden gebruikt, vereenvoudigen en verbeteren de zuivering van huishoudelijk afvalwater aanzienlijk. Het nieuwe concept, gebaseerd op het zogeheten Sharon- en Annammox-proces, is beproefd in een laboratorium en een proeffabriek. Het staat vast dat de systemen een maximale slibproductie en een behoorlijke afname van het verbruik van energie en chemicaliën garanderen. Bovendien wordt het slib vergist, wat weer biogas oplevert voor de opwekking van energie. In dit hoofdstuk wordt het opzienbarende concept - dat moeiteloos kan worden toegepast in de huidige, gemeentelijke zuiveringsinstallaties - beschreven.



De belangrijkste componenten die uit afvalwater moeten worden verwijderd, zijn CZV (chemisch zuurstofverbruik), ammonium en fosfaat. CZV en ammonium worden meestal verwijderd door middel van oxidatie, fosfaat door chemisch neerslaan of door biologische accumulatie in het slib. De belangrijkste kosten en problemen bij het verwijderen van CZV en stikstof zijn:

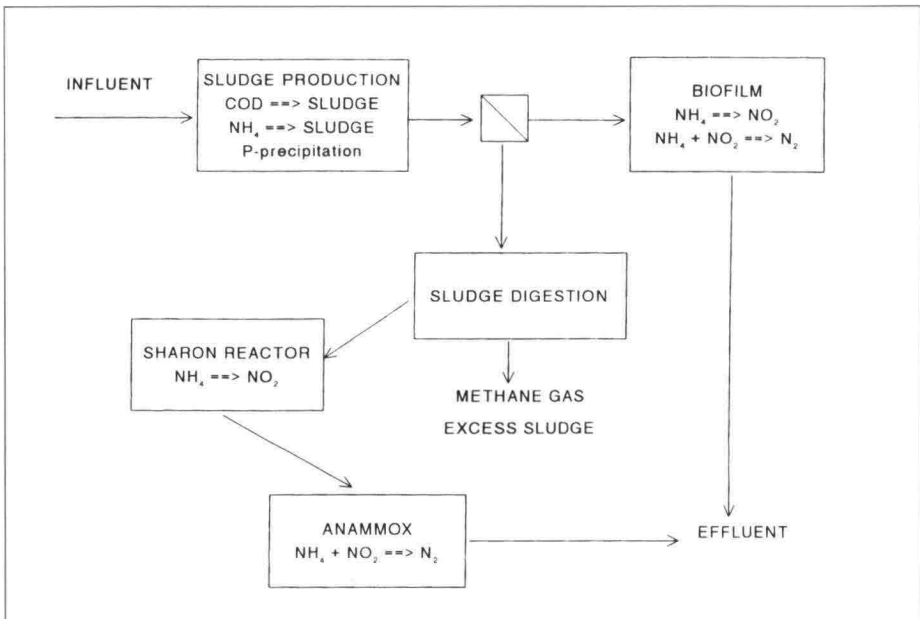
- De introductie van zuurstof (lucht) in afvalwater voor het oxideren van CZV en ammonium vereist grote hoeveelheden energie
- Tijdens de oxidatie gaat de in CZV aanwezige energie (14 MJ/kg) verloren als metabolische warmte
- CZV is vereist voor het verwijderen van stikstof tijdens denitrificatie. De hoeveelheid CZV in afvalwater is beperkt. Daarom is het soms nodig het voor denitrificatie vereist CZV (bijvoorbeeld methanol) aan te schaffen
- Door de voor nitrificatie vereiste hoge slibleeftijd zijn grote reactoren (oppervlaktebeslag) nodig.

In deze bijdrage wordt een nieuw concept besproken voor een gemeentelijk afvalwaterverwerkingsstelsel, waarin stikstof wordt verwijderd met een minimum aan CZV en energie, terwijl het overblijvende CZV wordt gebruikt voor het opwekken van energie in

de vorm van methaan (biogas). Dit concept is gebaseerd op twee nieuwe processen, die onlangs in het Kluyverlaboratorium voor Biotechnologie zijn ontwikkeld. Er is vanuit gegaan dat de samenstelling van afvalwater voorlopig geen grote verandering ondergaat. Toch gaan we na hoe mogelijke veranderingen in de samenstelling van het afvalwater, de werking van het concept kunnen beïnvloeden.

AFVALWATERZUIVERING MET MINIMAAL ENERGIEVERBRUIK

Figuur 1 toont een vereenvoudigd stroomdiagram van het concept. Om de energie die in de vorm van CZV in het afvalwater aanwezig is te kunnen terugwinnen, moet dit CZV worden omgezet in methaan (biogas). Vanwege de voor een goede omzetting in methaan vereiste hoge temperaturen is zo'n omzetting in gematigde en koude klimaten alleen praktisch als het CZV eerst wordt geconcentreerd. CZV in deeltjes kan worden geconcentreerd door middel van neerslaan of uitvlokken en bezinken. Tijdens het neerslaan zal ook een deel van de fosfor worden verwijderd. Concentratie van oplosbaar CZV is mogelijk in een systeem met een korte retentietijd voor vaste stoffen, waardoor de productie van slib maximaal is. Hierdoor is tevens de assimilatie van stikstof in het slib maximaal. Beide processen voor het concentreren van CZV kunnen worden gecombineerd in één systeem, dat lijkt op de A-trap van een A/B-proces (Boehnke, 1978). Tabel 1 geeft een overzicht van het zuiveringsrendement van de A-trap van een A/B-proces bij de Rotterdamse afvalwaterzuivering. Dit systeem is nog niet helemaal optimaal, maar door verbetering van het uitvlokings- of conversieproces is het mogelijk het rendement te verbeteren. Het tijdens deze fase geproduceerde slib kan worden ontbonden. Het slib leent zich beter voor vergisting dan gewoon secundair slib. Als gevolg hiervan zal de totale slibproductie lager zijn (Van Loosdrecht e.a., 1997). Nadat het slib van de A-trap is gescheiden en ontbonden, blijven er in wezen twee waterstromen over: een kleine, warme, geconcentreerde stroom (0,5-1,5 kg N/l) en een grote, verdunde, koude stroom zonder CZV, maar met wat ammonium (10-30 mg N/l).



FIGUUR 1: Stroomschema van het voorgestelde concept voor een duurzamere AWZI.

De stikstof van deze stromen kan worden verwijderd door toepassing van een gedeeltelijke oxidatie van ammonium tot nitriet, waarna het nitriet wordt gedenitrificeerd met ammonium als elektronendonor. De twee voor deze processen essentiële systemen zijn onlangs ontwikkeld in het Kluyverlaboratorium voor Biotechnologie: het Sharon- en het Anammox-proces (Van Loosdrecht en Jetten, 1996). Eerst beschrijven wij deze twee nieuwe processen, daarna volgt een meer algemene bespreking en evaluatie.

Het Sharon-proces (Single reactor system for High Ammonium Removal Over Nitrite) Het Sharon-proces (Brouwer, 1996; Hellinga, 1997) is bij uitstek geschikt voor het verwijderen van stikstof uit afvalstromen met een hoge concentratie ammonium ($>0,5$ g N/l). Het wordt uitgevoerd in een enkele, geroerde vatreactor zonder enige slibretentie. Bij temperaturen boven 25°C resulteerde dit in stabiele nitrificatie met nitriet als eindproduct (Turk en Mavinic, 1989; Rahmani, 1995). Voor het concept dat hier wordt beschreven, hoeft slechts 50% van het ammonium te worden omgezet in nitriet (vergelijking 1). Dit houdt in dat er geen base hoeft te worden toegevoegd, aangezien het merendeel van het afvalwater afkomstig van anaërobe vergistingsprocessen genoeg basische bestanddelen bevat (in de vorm van bicarbonaat) om de zuurproductie te compenseren als slechts 50% van het ammonium hoeft te worden geoxideerd. Het Sharon-proces is uitgebreid op laboratoriumschaal beproefd voor de behandeling van de uitlopen van slibvergistingsystemen en is momenteel in constructie bij twee Nederlandse afvalwaterzuiveringsbedrijven. De belangrijkste kenmerken van het systeem worden kort behandeld.

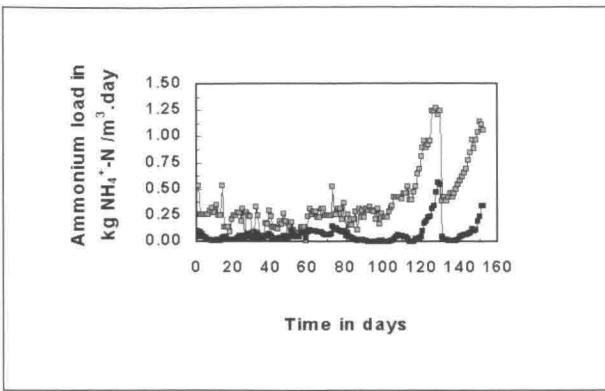


Omzetting in een chemostaat Het Sharon-proces vindt plaats zonder slibretentie. Dit betekent dat leeftijd van het slib (SRT) gelijk is aan de hydraulische verblijftijd (HRT). In zo'n systeem hangt de concentratie van de afvoerstroom alleen af van de groeisnelheid ($1/\text{SRT}$) van de betrokken bacteriën, onafhankelijk van de concentratie van de aanvoerstroom. De betrekking tussen deze parameters wordt voorgesteld door vergelijking (2). Hierin is K de affiniteitsconstante voor het substraat.

$$\text{HRT} = \text{SRT} = \text{SRT}_{\min} * (K + C) / C \quad (2)$$

Tijdens het Sharon-proces worden snelgroeïende ammonium oxiderende bacteriën geselecteerd. Deze organismen hebben echter een lage affiniteit voor ammonium (hoge waarden van K) (Brouwer, 1996). In de praktijk leidt dit tot afvoerstromen met betrekkelijk hoge concentraties ammonium (10-100 mg N/l). Daarom is het Sharon-proces het meest geschikt voor de zuivering van warm afvalwater met een hoge concentratie ammonium (>500 mg N/l). Tijdens het totale proces is een omzetting van slechts 50% vereist, aangezien het Anammox-proces een aanvoerstroom vereist van ammonium en nitriet in een verhouding van 1 op 1.

Nitriet als tussenstap Het Sharon-proces toegepast op afvoerstromen van slibvergistingsystemen wordt bij een temperatuur van 35°C uitgevoerd in een chemostaat zonder slibretentie, zodat de verdunningsgraad zo kan worden ingesteld dat ammonium oxiderende bacteriën snel genoeg groeien om in de reactor achter te blijven, terwijl de nitriet oxiderende bacteriën worden uitgespoeld. Het Sharon-proces is in ons laboratorium gedurende meer dan twee jaar toegepast op afvoerstromen van vergistingsystemen (tabel 2). Het is aangetoond dat het proces inderdaad in staat is ammonium

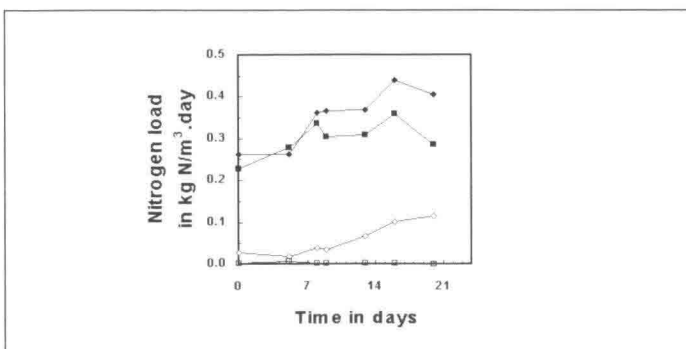


FIGUUR 2: Verwijdering van ammonium uit de afvoerstroam van een slibvergistingsinstallatie in een Anammox-werfelbedreactor, gebruikmakend van een synthetische nitrietoplossing (Jetten, 1996).

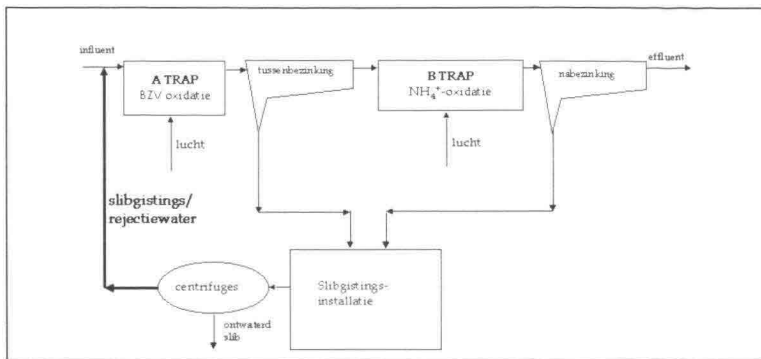
stabiel te oxideren tot nitriet. Bovendien zijn de ammoniumoxiderende bacteriën die aan het systeem zijn toegevoegd, bestand tegen hoge concentraties nitriet (>1 g NO₂-N/l bij pH 7).

pH-Regeling Tijdens de oxidatie van ammonium tot nitriet worden twee equivalenten protonen geproduceerd per mol omgezette ammonium. In afvalstromen met grote hoeveelheden ammonium moet de pH dus worden bijgesteld. In het geval dat een afvoerstroam van een slibvergistingsinstallatie wordt gebruikt, wordt één equivalent base geleverd door het in de afvoerstroam aanwezige bicarbonaat (vergelijking 1). Het overblijvende zuur moeten worden geneutraliseerd. Dit kan plaatsvinden door middel van toevoeging van een base of via denitrificatie van het nitriet. De kosten voor het toevoegen van methanol voor denitrificatie zijn lager dan die voor het toevoegen van een base via een direct pH-regelsysteem.

In de voorgestelde opzet hoeft het ammonium voor slechts 50% te worden omgezet. Dit kan eenvoudig worden bereikt. In afvalstromen van anaërobe vergistingsinstallaties treedt bicarbonaat op als tegenion voor ammonium (vergelijking 1). Als er geen pH-regeling wordt toegepast, wordt het bicarbonaat gebruikt als ongeveer 50% van het ammonium is omgezet. Daarna daalt de pH in de reactor snel en houdt de nitrificatie op bij een pH-waarde rond 6,4. In een chemostaatachtig proces betekent dit dat als er geen pH-regeling plaatsvindt, slechts 50% van het ammonium wordt geoxideerd tot



FIGUUR 3: Verwijdering van ammonium uit de afvoerstroam van een slibvergistingsinstallatie in een gecombineerd Sharon-Anammox-systeem.



Schematische weergave van de rioolwaterzuiveringsinstallatie Dokhaven, Rotterdam.

nitriet. Een afvalstroom die een mengsel van gelijke hoeveelheden ammonium en nitriet bevat, is bij uitstek geschikt als toevoerstrom van het Anammox-proces.

Er is geen verschil in alkaliteitsconsumptie tussen een conventioneel proces en het hier beschreven nitrificatieproces. Aangezien echter slechts 50% van het ammonium hoeft te worden genitrificeerd, kan de alkaliteit volledig worden geleverd door het in het afvalwater aanwezige bicarbonaat (bijvoorbeeld als dit water de afvoerstrom van anaërobie reactoren vormt). Hierdoor hoeft niet te worden gewisseld tussen nitrificatie- en denitrificatiereactoren om de pH te regelen, zoals gebeurt bij conventionele processen voor het verwijderen van stikstof (Brouwer, 1996).

HET ANAMMOX-PROCES (ANAEROBIC AMMONIUM OXIDATION) Het Anammox-proces is een proces waarin onder anaërobie omstandigheden nitriet (of nitraat via nitriet) wordt omgezet in stikstofgas met ammonium als elektronendonor (vergelijking 3).



De bacteriën die bij de Anammox-reactie als katalysator optreden, zijn autotroof. Dat wil zeggen dat nitriet kan worden omgezet in stikstofgas zonder gebruik van CZV of toevoeging van externe methanol (Van de Graaf, 1996; Jetten, 1997). Het Anammox-proces is door Mulder ontdekt in een proeffabriek van Gist-Brocades (1995). Hij merkte op dat grote hoeveelheden ammonium verdwenen, terwijl tegelijkertijd de consumptie van nitraat en de productie van stikstofgas toenamen.

De biologische aard van het proces kon worden aangetoond doordat de Anammox-activiteit ongedaan werd gemaakt door gammabestraling of verhitting van het slib in de proefopstelling (Van de Graaf, 1995). Bovendien werd geconstateerd dat nitriet de voorkeur genoot als elektronacceptor in het proces.

De micro-organismen die verantwoordelijk zijn voor het proces, zijn verrijkt in een werfelbedreactor op een synthetisch medium dat ammonium, nitriet en bicarbonaat bevat (Van de Graaf, 1996). De groeisnelheid en de groeiopbrengst van de organismen zijn erg laag. Een duidelijk voordeel van het Anammox-proces is daarom een lage productie aan sliboverschot. Er zijn echter systemen met een efficiënte slibretentie nodig om al het Anammox-slib in de reactor te houden. Verder zijn lange opstarttijden vereist om genoeg biomassa te kweken. De bereikte stikstofomzettingssnelheden zijn ongeveer 0,25 kg N_{tot}/kg SS/dag, wat twintig maal hoger is dan de snelheden (0,012 kg N_{tot}/kg SS/dag) die worden bereikt met conventionele nitrificatie in geactiveerd-slibsystemen.

Haalbaarheidsonderzoek

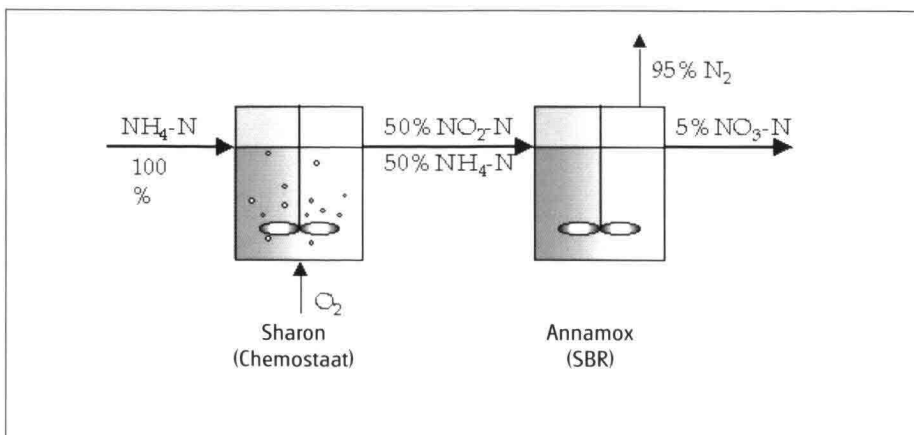
In een recent haalbaarheidsonderzoek (Jetten, 1996; Strous, 1997) is de verwijdering van ammonium uit de afvoerstream van slibvergistingsinstallaties onderzocht met het Anammox-proces. De resultaten van dit onderzoek laten zien dat het Anammox-slib niet nadelig wordt beïnvloed door de afvoerstream van deze installaties. De voor het proces optimale pH (7,0-8,5) en temperatuur (30-37°C) liggen ruim binnen het bereik van de waarden die in dergelijke afvoerstromen worden gevonden.

Experimenten met een wervelbedreactor op laboratoriumschaal (2 liter; figuur 2) hebben aangetoond dat het Anammox-slib in staat was ammonium en nitriet op efficiënte wijze te verwijderen uit de afvoerstream van de slibvergistingsinstallatie (tabel 2). De stikstofbelasting van de Anammox-wervelbedreactor kon worden verhoogd van 0,2 kg $N_{\text{tot}}/m^3_{\text{reactor}}$ per dag tot 2,6 kg $N_{\text{tot}}/m^3_{\text{reactor}}$ per dag. Als gevolg van de nitrietbeperking kon de maximale capaciteit niet worden gehaald. Tijdens experimenten met synthetisch afvalwater zijn waarden van 5,1 kg $N_{\text{tot}}/m^3_{\text{reactor}}$ per dag gehaald (Van de Graaf, 1995; 1996). Tijdens het experiment met afvoerstromen van slibvergistingsinstallaties nam de snelheid waarmee stikstof werd omgezet, toe van 0,04 kg N_{tot}/kg SS per dag tot 0,26 kg N_{tot}/kg SS per dag.

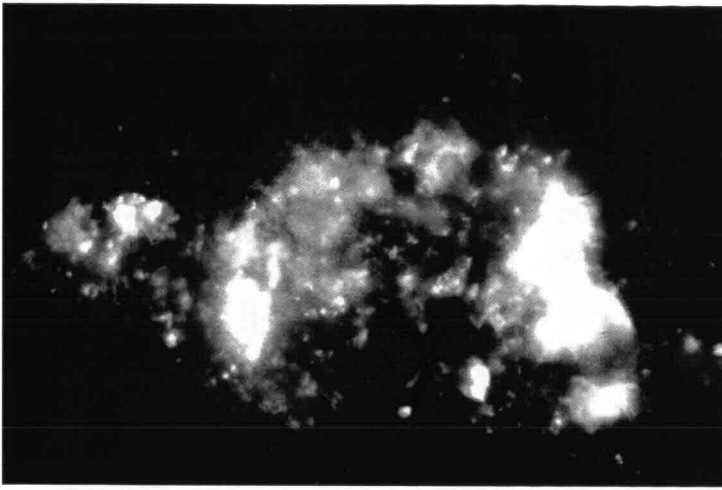
Tijdens het haalbaarheidsonderzoek is behalve een wervelbedreactor ook een sequentiële badge-reactor onderzocht. Met dit reactorsysteem verwijderde het Anammox-slib ammonium voor $81\pm 1\%$ en nitriet voor $99\pm 1\%$ uit de afvoerstream van de slibvergistingsinstallatie. De maximale stikstofbelasting was na 3 maanden bedrijf 0,05 kg $N_{\text{tot}}/m^3_{\text{reactor}}$ per dag, terwijl de omzettingssnelheid 0,17 kg N_{tot}/kg SS per dag bedroeg.

HET GECOMBINEERDE SHARON-ANAMMOX-PROCES

De combinatie van het Anammox-proces met het Sharon-proces is met goed gevolg in ons laboratorium beproefd, gebruikmakend van de afvoerstream van een slibvergistingsinstallatie (figuur 3). De Sharon-reactor werkte zonder pH-regeling met een totale stikstofbelasting van ongeveer 0,8 kg N/ m^3 per dag. Het in de afvoerstream van de slibvergistingsinstallatie aanwezige ammonium werd voor 53% omgezet in nitriet (39%) en nitraat (14%; tabel 3). De vorming van nitraat was het gevolg van de aangroei van een biofilmwand die niet regelmatig werd verwijderd. Bij toepassingen op grote schaal zal deze waarde aanzienlijk lager zijn als gevolg van de kleinere verhouding van oppervlakte tot inhoud. Op deze wijze werd een ammonium/nitriet-mengsel verkregen dat geschikt is voor het



FIGUUR 4: Schematische weergave van het SHARON-ANAMMOX-proces.



Close-up van de microbiële micromassa bij het SHARON-proces.

Anammox-proces. De afvoerstream van de Sharon-reactor werd gebruikt als toevoerstream van de Anammox-wervelbedreactor. In de Anammox-reactor met beperkt nitriet werd al het nitriet verwijderd, terwijl het overschot aan ammonium overbleef. Tijdens de proefperiode was het rendement van de ammoniumverwijdering 83%. In tabel 3 zijn de stikstofbalansen van de beide systemen samengevat. Het optimaliseren en toepassen van de combinatie van deze twee processen in een proeffabriek en op volle schaal, vormt nog een uitdaging voordat toepassing in een toekomstige waterzuiveringsinstallatie kan plaatsvinden.

GEÏNTEGREERDE EN OPTIMALE VERWIJDERING VAN CZV EN AMMONIUM UIT AFVALWATER

Hierna wordt beschreven hoe CZV en ammonium uit afvalwater kunnen worden verwijderd met een minimaal verbruik aan energie en chemicaliën.

Gewoonlijk worden in de meeste zuiveringssystemen opgelost, colloïdaal en vast CZV afkomstig uit afvalwater aëroob geoxideerd. Per kg CZV wordt 0,6 kg zuurstof verbruikt. Door de hoeveelheid geproduceerd slib zo groot mogelijk te maken, kan de behoefte aan zuurstof zo klein mogelijk worden gehouden. Uitvlokken en neerslaan van colloïdaal en vast CZV vereist geen zuurstof, maar slechts een beperkte hoeveelheid chemicaliën. CZV in suspensie moet door het slib worden opgenomen met een korte retentietijd voor vaste stof. Op deze wijze kan de endogene ademhaling zo klein mogelijk worden gehouden. Om het colloïdaal CZV op efficiënte wijze te kunnen afscheiden, moeten een uitvlokmiddel worden toegevoegd. Dit kan op efficiënte wijze worden gecombineerd met de verwijdering van fosfor. Het op deze manier geproduceerde slib kan worden geconcentreerd en worden gebruikt voor vergisting, waarbij methaan wordt gevormd. Per kg CZV-slib kan 0,5 kg methaan-CZV worden geproduceerd. Deze behandeling biedt de volgende voordelen:

- Minimaal energieverbruik (0,2 kg in plaats van 0,6 kg zuurstof per kg CZV)
- Dankzij de hoge belasting kan een compacte installatie (minimaal oppervlaktebeslag) met een korte hydraulische retentietijd worden gebruikt
- Een aanzienlijk deel van de stikstof wordt in het slib geconcentreerd en zodoende uit het afvalwater verwijderd
- Er wordt nuttige energie in de vorm van biogas geproduceerd

| | Aanvoer (mg/l) | Afvoer (mg/l) | Verwijderingsrendement (%) |
|---------------------------------------|-------------------|------------------|-------------------------------|
| BOD | 173 | 26 | 85 |
| Kjeldahl-N (hoofdz. NH_4^+) | 46 | 26 | 44 |
| P_{tot} | 6,4 | 1,4 | 78 |

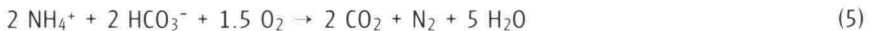
TABEL 1: Voorbeeld van het huidige functioneren van een A-trap in het A/B-proces van de Rotterdamse afvalwaterzuivering (HRT = 30 min). De dosering van de gebruikte chemicaliën is 0,4 mol Fe / mol P en 1,2 g uitvlokmiddel per m^3 .

| | SHARON | ANAMMOX | |
|---|-----------------------|-----------|---|
| Ammoniumbelasting | 0,63-1,0 ^a | 0,24-1,34 | kg $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{m}^3_{\text{reactor-dag}}$ |
| Nitrietbelasting | n.v.t. | 0,22-1,29 | kg $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{m}^3_{\text{reactor-dag}}$ |
| Stikstofbelasting | 0,63-1,0 | 0,48-2,63 | kg $\text{N}_{\text{tot}}\text{-N}/\text{m}^3_{\text{reactor-dag}}$ |
| $\text{NH}_4^+\text{-N}$ -afvoerstroom | 199 | 27-85 | mg N/l |
| $\text{NO}_2^-\text{-N}$ -afvoerstroom | 469 | 3-3 | mg N/l |
| Rendement verwijdering $\text{NH}_4^+\text{-N}$ | 76-90 | 88-9 | % |
| Rendement verwijdering $\text{NO}_2^-\text{-N}$ | n.v.t. | 99-2 | % |
| Slibbelasting | 10,3 | 0,05-0,26 | kg $\text{N}_{\text{tot}}/\text{kg SS}$ per dag |

a Deze waarde is recht evenredig met de concentratie van de aanvoerstroom

TABEL 2: Overzicht van de parameters van een Anammox-wervelbedreactor (Jetten, 1996) en een Sharon-reactor (Brouwer, 1996), beide gevoed met de afvoerstroom van een slibvergistingsinstallatie. Het nitriet voor het Anammox-proces werd afzonderlijk geleverd.

Ammonium Na de scheiding en vergisting van het slib blijven er twee stromen over: de afvoerstroom van de slibbehandeling (een warme, geconcentreerde stroom) en het afvalwater zelf (een grote, verdunde, koude stroom). De hoofdcomponent van de beide stromen wordt gevormd door ammonium. Zoals eerder gesteld, zou het gecombineerde Sharon-Anammox-proces geschikt zijn om het ammonium uit beide stromen te verwijderen. Door het gecombineerde proces toe te passen is slechts 1,7 kg zuurstof nodig per kilogramverwijderde $\text{NH}_4^+\text{-N}$, terwijl geen toevoeging van CZV nodig is. In het conventionele proces zijn 4,6 kg zuurstof en 4,5 kg CZV nodig. De nettoreactievergelijking voor het gehele proces (5) luidt:



Om ammonium te verwijderen uit de resterende grote, koude stroom is het Sharon-proces in de vorm van een geroerde vatreactor zonder retentie van biomassa waarschijnlijk niet de meest geëigende oplossing. Voor deze stroom lijkt het gebruik van een compact biofilmproces geschikter. In zo'n systeem kan de vorming van nitriet worden bewerkstelligd door de opgeloste zuurstof nauwkeurig te regelen. In verschillende onderzoeken naar biofilmreactoren is deze mogelijkheid onderzocht en voor toepassing aangedragen (Garrido, 1997). De reden voor deze accumulatie houdt verband met een lagere affiniteit voor zuurstof van de nitriet-oxiderende bacteriën vergeleken met de ammonium oxiderende bacteriën (Hunik, 1994; Picioreanu, 1997). De vereiste verhouding van 1 op 1 van ammonium en nitriet voor het Anammox-proces kan worden bereikt door manipulatie van de zuurstofspanning, of door een deel van het afvalwater rechtstreeks

naar de Anammox-reactor om te leiden. De opbrengst aan biomassa van al deze systemen is erg laag en leidt tot een zeer lage productie van slib. In tabel 4 zijn de belangrijkste parameters van een conventioneel afvalwaterzuiveringssysteem en het hier voorgestelde concept samengevat. Als conventioneel systeem is een laagbelaste geactiveerd-slibinstallatie (0,05 kg BOD/kg per dag) zonder slibvergisting gekozen.

GEVOLGEN VAN TOEKOMSTIGE VERANDERINGEN IN DE SAMENSTELLING VAN HET AFVALWATER VOOR HET CONCEPT

Afname van de afvalwaterstroom De hoeveelheid afvalwater die in een afvalwaterzuiveringsinstallatie wordt behandeld, zal in de toekomst afnemen als regels voor het terugdringen van het waterverbruik van kracht worden en directe infiltratie of het gebruik van regenwater worden aangemoedigd. Een afname van de afvalwaterstroom levert in het concept geen problemen op, zij leidt slechts tot nog kleinere en compactere installaties.

Afzonderlijke inzameling van urine Een afzonderlijke inzameling van urine leidt tot een dramatische afname van de concentraties stikstof en fosfor in het afvalwater (Larsen, 1996). De overblijvende voedingsstoffen zullen volledig worden verbruikt voor de productie van slib zoals eerder omschreven. Dit betekent dat de grote, koude stroom

| | Sharon Aanvoer | (mg N/l) Afvoer/Aanvoer | Anammox Afvoer |
|-------------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|
| NH ₄ ⁺ | 584 | 267 | 29 |
| NO ₂ ⁻ | <1 | 227 | 1,4 |
| NO ₃ ⁻ | <1 | 64 | 83 |
| N ₂ O ^a | <1 | 4 | <1 |
| N ₂ ^a | <1 | <1 | 476 ^b |

a concentratie ten opzichte van de aanvoerstroom.
b bepaald als het verschil tussen opgeloste en gasvormige stikstofverbindingen.

TABEL 3: Stikstofbalansen in het gecombineerde Sharon-Anammox-proces. Resultaten verkregen uit een voorlopige laboratoriumproef met de afvoerstroom van een slibvergistingsinstallatie.

| | Conventioneel systeem | Voorgesteld systeem |
|---|-----------------------|---------------------|
| Zuurstofvraag | | |
| kg O ₂ per kg verwijderde N | 4,65 | 1,7 |
| kg O ₂ per kg verwijderde CZV | 0,6 | 0,2 |
| CZV-vraag | | |
| kg CZV per kg verwijderde N | 4-5 | 0 |
| Methaanproductie | | |
| kg CH ₄ -CZV per kg verwijderd CZV | 0 | 0,5 |
| Slibproductie | | |
| kg slib-CZV per kg verwijderd CZV | 0,4 | 0,3 |

TABEL 4: Belangrijkste verschillen (in totale waarden) tussen een conventioneel, laagbelast (0,05 kg BOD/kg VSS per dag) geactiveerd-slibstelsel en het nieuwe systeem, beschreven in dit artikel.

niet langer afzonderlijk behandeld hoeft te worden. Alle stikstof komt vrij in de afvoerstream van de slibvergisting en kan worden verwijderd door middel van het gecombineerde Sharon-Anammox-proces. Deze behandeling zou ook kunnen worden toegepast op de afzonderlijk ingezamelde urine.

Waterzuivering op kleine schaal Er is een ontwikkeling naar de behandeling van afvalwater aan de bron in kleinschalige processen. Ook bij deze kleinschalige systemen zal slib worden geproduceerd. Dit slib moet worden verzameld en behandeld in grote slibvergistingsinstallaties. De afvoerstromen van deze installaties kunnen worden behandeld met het gecombineerde Sharon-Anammox-systeem.

IMPLEMENTATIE VAN HET CONCEPT EN TECHNISCHE HAALBAARHEID Het nieuwe concept kan zonder veel problemen worden ingepast in de huidige infrastructuur. Door compacte reactoren met een minimaal oppervlaktebeslag te gebruiken, is toepassing op bestaande locaties mogelijk. Het Anammox- en Sharon-proces zijn uitvoerbaar en terdege beproefd in het laboratorium en in een proeffabriek met bestaand afvalwater. De verwijdering van CZV door het proces kan worden bewerkstelligd in een geoptimaliseerde A-trap van een A/B-proces. Dit proces is reeds vele jaren in gebruik, maar behoeft optimalisatie. De haalbaarheid van een analoog proces voor de directe behandeling van afvalwater is nog niet beproefd. De lage concentraties zullen geen probleem vormen, maar de lagere temperaturen kunnen aanleiding geven tot lagere omzettingssnelheden.

TENSLOTTE Hiervoor is een nieuw concept beschreven voor een gemeentelijk afvalwaterzuiveringssysteem, waarin een aanzienlijke afname in het verbruik van energie en chemicaliën wordt bereikt. Bovendien vindt er een optimale terugwinning van CZV (in de vorm van methaan) plaats en vergt de behandeling minimale middelen. Bij toepassing van het gecombineerde Sharon-Anammox-proces zal de verwijdering van stikstof niet langer de toevoer van CZV vereisen. Het gecombineerde systeem kan daardoor onafhankelijk werken. Hierdoor wordt het mogelijk de verwijdering van CZV en stikstof afzonderlijk te optimaliseren. Er hoeven niet langer ingewikkelde compromissen te worden overwogen tussen de verwijdering van CZV en N, zoals bij conventionele processen. Uit de beschrijving zal duidelijk zijn dat het concept de zuivering van huishoudelijk afvalwater aanzienlijk vereenvoudigt.

Met dank aan de Stichting Toegepast Wateronderzoek, de Stichting voor Technische Wetenschappen, de Koninklijke Nederlandse Academie van Wetenschappen, Gist-Brocades, DSM en de Grontmij. Zij steunden het onderzoek naar de technologie van stikstofomzetting.

Voorts gaat de dank van de auteurs uit naar J.G. Kuenen en J.J. Heijnen voor hun stimulerende discussies en steun, en diverse medewerkers en studenten voor hun bijdragen in de loop der jaren.

REFERENTIES

- Boehnke, B. (1978) - Möglichkeiten der Abwasserreinigung durch das 'Adsorption-Belebungs-Verfahren'. GWA 29. Schriftreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Duitsland.
- Brouwer, M., Van Loosdrecht, M.C.M., en Heijnen J.J. (1996) - Behandeling van stikstofrijke retourstromen op rioolwaterzuiveringsinstallaties, enkelvoudig reactorsysteem voor de verwijdering via nitriet. STOWA rapport 96-01, STOWA, Utrecht.
- Garrido, J.M., Van Benthum, W.A.J., Van Loosdrecht, M.C.M., en Heijnen, J.J. (1998) - Influence of dissolved oxygen concentration on nitrite accumulation in a biofilm airlift suspension reactor. *J. Environ. Eng.* 124, 239 - 248.
- Hellinga, C., Van Loosdrecht, M.C.M., en Heijnen, J.J. (1997) - Model based design of a novel process for ammonia removal from concentrated flows. Proc. 2nd Mathmod, TU Vienna Austria.
- Hunik, J.H. (1994) - Engineering aspects of nitrification with immobilized cells. Proefschrift Landbouwniversiteit Wageningen.
- Jetten, M.S.M., Logemann, S.M., Muyzer, G., De Vries, S., Van Loosdrecht, M.C.M., Robertson, L.A., en Kuenen, J.G. (1997) - Novel principles in the microbial conversion of nitrogen compounds. *Antonie van Leeuwenhoek* 71, 75-93.
- Jetten, M.S.M., Strous, M., Van Gerven, E., Zheng, P., en Kuenen, J.G. (1996) - Verwijdering van ammonium uit slibgistingwater met behulp van het Anammoxproces. STOWA rapport 96-21, STOWA, Utrecht.
- Larsen, T.A., and Gujer, W. (1996) Separaat management of antropogenic nutrient solutions, Proc. 18th IAWQ biennial, vol. 3, 73-80.
- Mulder, A., Van de Graaf, A.A., Robertson, L.A., en Kuenen, J.G. (1995) - Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor. *FEMS Microbiol Lett.* 16, 177-184.
- Picoreanu, C., Van Loosdrecht, M.C.M., en Heijnen, J.J. (1997) - Modelling of the effect of oxygen concentration on nitrite accumulation in a biofilm airlift suspension reactor. *Wat. Sci. Tech.*, 36, 147 - 156.
- Rahmani, H., Rols, J.L., Capdeville, B., Cornier, J.C., en Deguin, A. (1995) - Nitrite removal by a fixed culture in a submerged granular biofilter. *Wat. Res.* 29, 1745-1753.
- Strous, M., Van Gerven, E., Zheng, P., Kuenen, J.G., en Jetten, M.S.M. (1997) - Ammonium removal from sludge digestion effluents with Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) process. *Wat. Res.*, 31, 1955 - 1962.
- Turk, O., en Mavinic, D.S. (1989) - Stability of nitrite build up in an activated sludge systeem. *J. Wat. Poll. Control. Fed.* 61, 1440-1448.
- Van de Graaf, A.A., Mulder, A., De Bruijn, P., Jetten, M.S.M., Robertson, L.A., en Kuenen, J.G. (1995) - Anaerobic ammonium oxidation in a biological mediated process. *Appl. Environ. Microbiol.* 61, 1246-1251.
- Van de Graaf, A.A., De Bruijn, P., Robertson, L.A., Jetten, M.S.M., en Kuenen, J.G. (1996) - Autotrophic growth of anaerobic, ammonium-oxidising bacteria in a fluidized bed reactor. *Microbiology (UK)* 142, 2187-2196.
- Van Loosdrecht, M.C.M., en Jetten, M.S.M. (1996) - De RWZI (AWZI) van de toekomst: een combinatie van het Anammox-proces en het Sharon-proces. In: STOWA 25 jaar toegepast onderzoek waterbeheer. Klapwijk SP (Ed) Stowa rapport 11, ISBN 90.74476.59.7 Utrecht, pp 155-171.
- Van Loosdrecht, M.C.M., Kuba, T., Van Veldhuizen, H.M., Brandse, F.A., en Heijnen, J.J. (1998) - Environmental impacts of nutrient removal processes: a case study. *J. Environ. Eng.* 124, 482 - 483.

NÓG EEN POLDERMODEL:

HOGE-STERKTE **BETON**

Van idee naar realisatie –innovatie in
de bruggenbouw

J.C. Walraven
25

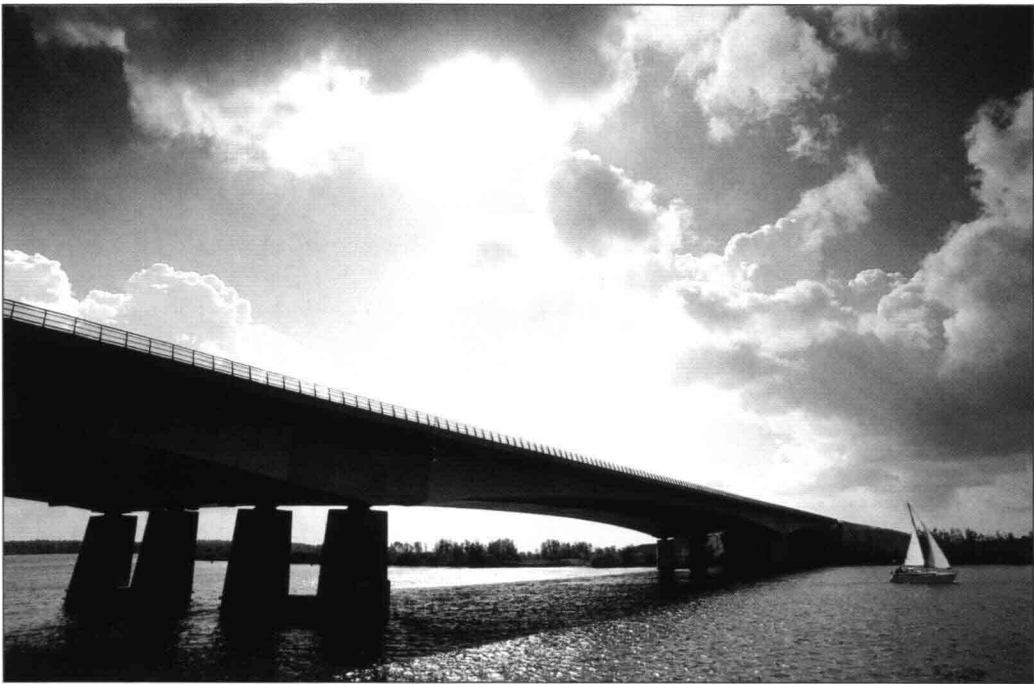
• • •

De brug bij Burgerveen is de eerste Nederlandse brug die ooit is uitgevoerd in beton met een hoge sterkte, nummer twee werd de tweede Stichtse Brug. Hoge-sterkte beton is een typisch Nederlands voorbeeld van innovatie in de bouw. In Duitsland stonden de autoriteiten de bouw van een brug met dit beton niet toe, omdat er te weinig ervaring met dit nieuwe materiaal was. In Nederland werd hoge-sterkte beton meteen 'iedereens product' en was er voor het invoeren direct een groot draagvlak, doordat de kennisontwikkelaars maar ook de kennisgebruikers in een vroeg stadium bij de ontwikkeling werden betrokken. Zowel Rijkswaterstaat, de TU Delft, de betonmortelindustrie, de aannemers als de adviesbureaus en de prefab-industrie zaten in de studieverenigingen. Hoe hoge-sterkte beton dankzij het 'poldermodel' van idee tot realisatie kwam.

• • •

Innovatie in de bouw kan op verschillende manieren tot stand komen. Enerzijds kan de markt vragen om een bepaalde nieuwe ontwikkeling: er wordt dan naar de oplossing gezocht van een bepaald, van tevoren gedefinieerd probleem. Anderzijds kunnen zich nieuwe ontwikkelingen voordoen op het gebied van bijvoorbeeld de materiaalkunde, waarbij vervolgens de vraag rijst of er kansen zijn voor toepassing. In het laatste geval zal veel afhangen van de relatie tussen de academische ontwikkelaar en de praktische eindgebruiker. Het materiaal hoge-sterkte beton is een voorbeeld van zo'n nieuwe ontwikkeling waarbij, door een goede relatie tussen de kennisgenererende instelling en de potentiële toepasser, in onverwacht korte tijd belangrijke innovaties tot stand kwamen.

HOGE-STERKTE BETON EN ZIJN DIMENSIONERINGSREGELS In de dictaten van prof.dr.ir. A.S.G. Bruggeling [1] kwam het in figuur 1 getoonde diagram voor. Het diagram geeft de relatie weer tussen de watercementfactor (wcf) van een betonmengsel en de



De tweede Stichtse Brug over het Eemmeer is Nederlands eerste brug gemaakt van hoge sterkte beton.

te behalen sterkte van het beton. De maximaal in het diagram opgenomen watercementfactor is 0,9. Uit de relatie blijkt, dat het verlagen van de watercementfactor leidt tot een verhoging van de betonsterkte.

Voor normaal gestort beton wordt een maximum bereikt bij een wcf van 0,5. Wordt de wcf verder verlaagd, dan treedt een daling van de sterkte op, omdat de verwerkbaarheid steeds minder wordt. De figuur geeft aan dat door mechanische behandeling (stampen, trillen) een hogere sterkte haalbaar is. De maximale sterkte van getrild beton ligt iets boven de 40 N/mm^2 , bij een wcf van 0,3. De bijbehorende betonsterkteklasse is B35, een waarde die voor een praktijkstort lange tijd als het maximum haalbare werd gezien.

Interessant is in dit verband ook het verschijnen van CUR-Rapport 52 (CUR, Gouda) **Splijttreksterkte van hoogwaardig beton** in 1971. Onder 'hoogwaardig beton' verstond men in die tijd beton uit de kwaliteitsklassen B45-B65. Dit beton kon alleen fabrieksmatig, in prefabbedrijven, worden vervaardigd, waarbij van bijzondere methoden, zoals het extruderen, gebruikt werd gemaakt.

Een geheel nieuw perspectief ontstond, toen ontdekt werd dat door de toevoeging van silicafume, in combinatie met geschikte hulpstoffen, een aanzienlijke verhoging van de betondruksterkte kan worden bereikt, met behoud van verwerkbaarheid. Silicafume is een materiaal dat als bijproduct vrijkomt bij de fabricage van silicium. De korrels zijn ongeveer honderd maal zo klein als de cementkorrels en het materiaal is daarnaast ook nog reactief. De silicafumekorrels verspreiden zich tussen de cementkorrels en vormen bij het hydrateren hun eigen fijne kristalstructuur, waardoor in combinatie met het gehydrateerde cement een zeer dichte cementsteen ontstaat. Een kleine hoeveelheid silicafume (5% van het cementgewicht) is al voldoende.

Door het toevoegen van geschikte hulpstoffen is de verwerkbaarheid van zo'n mengsel

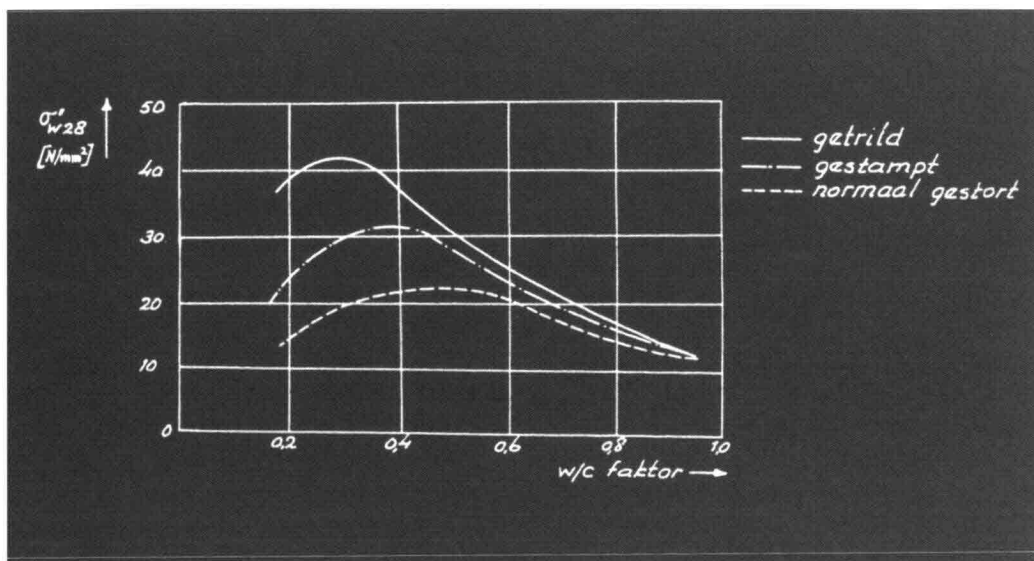
bovendien heel goed. Waarom en hoe de sterkte-eigenschappen van het beton door het toevoegen van silicafume worden beïnvloed, wordt in figuur 2a en 2b uitgelegd. Figuur 2a. toont, schematisch, de krachtsoverdracht in op druk belast beton. De krachten worden via het korrelskelet afgedragen. Door de heterogeniteit van dit skelet ontstaan zijdelingse reacties. De verharde cementsteen werkt als een soort lijm, die er voor zorgt dat deze reacties kunnen worden opgenomen. Als de lijm breekt is de druksterkte van het beton bereikt. Dit verklaart waarom op druk belast beton altijd bezwijkt door het optreden van scheurvorming in de krachtrichting.

Silicafume heeft twee effecten. In de eerste plaats worden door dit materiaal de ruimten tussen de fijne korrels gevuld. Hierdoor wordt het beton homogener zodat de zijdelingse reactiekrachten afnemen. Er wordt dus een kleiner beroep op de lijm gedaan. Verder wordt de lijm, door de reactiviteit van de silicafumekorrels, sterker, waardoor het bezwijken op druk nog verder wordt uitgesteld. Wordt het beton daarentegen op trek belast, dan is het effect van silicafume veel minder (figuur 2b). De vulfunctie heeft nu geen effect en de sterkteverhoging moet alleen van de sterkere lijm komen.

Dit verklaart een belangrijke eigenschap van hoge-sterkte beton: de druksterkte kan enorm worden verhoogd, maar de treksterkte houdt hiermee geen gelijke tred. Als de druksterkte met 50% toeneemt, blijkt de treksterkte slechts met ongeveer 15% toe te nemen. De verhoging van de elasticiteitsmodulus blijft nog verder achter bij de verhoging van de druksterkte. Bij 50% verhoging van de druksterkte neemt de elasticiteitsmodulus slechts met ongeveer 5% toe.

Men heeft hier dus te maken met een nieuw materiaal, waarvoor nieuwe dimensioneringsregels moesten worden afgeleid. Om dit te verwezenlijken werd CUR-Commissie C86 in het leven geroepen. In deze commissie had niet alleen de TU Delft zitting, maar waren Rijkswaterstaat, de betonmortelindustrie, de aannemers, de adviesbureaus en later ook de prefabindustrie vertegenwoordigd.

Aan de TU Delft werd uitvoerig experimenteel onderzoek uitgevoerd, als basis voor het opstellen van nieuwe dimensioneringsrichtlijnen voor beton met hoge sterkte. Dit onderzoek betrof een veelheid van gedragsaspecten. Onderzocht werd onder meer het



FIGUUR 1: Relatie tussen watercementfactor en 28-daagse betondrukke volgens Bruggeling in 1981.

lange-duurgedrag, de invloed van de scheurruwheid, het twee-assig gedrag van gewapende schijven, het verhardingsgedrag inclusief de warmte-ontwikkeling, de rotatiecapaciteit, het aanhechtings- en verankeringsgedrag en het afschuifdraagvermogen.

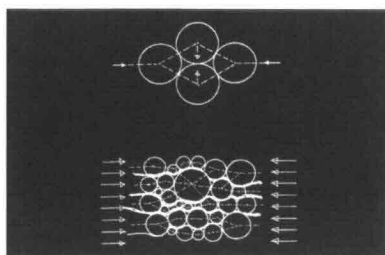
De kruip van hoge-sterkte beton is aanzienlijk geringer dan de kruip van de traditionele betonsoorten. Dit is een gunstige eigenschap voor de bouw van constructies met grote overspanning, zoals bruggen. Verbeterde formules voor kruip en krimp werden afgeleid in de dissertatie van N. Han [2]. In [3] werd bovendien een aanbeveling voor het berekenen van tijdsafhankelijke vervormingen op basis van een gewijzigde VBC-formulering gegeven.

Overigens kwam tijdens dit onderzoek ook een bijzonder fenomeen aan het licht, namelijk het optreden van een weinig bekende krimpvorm, de zogenaamde autogene krimp. Bij normale betonsoorten treedt vooral uitdrogingskrimp op. Het krimpproces is hierbij een langdurige kwestie (jaren). Autogene krimp komt voor bij betonsoorten met een watercementfactor lager dan 0,4. Hoge-sterkte beton, met een wcf van ongeveer 0,3 valt hier onder. De autogene krimp treedt op in combinatie met het verhardingsproces: bij het verharden neemt het volume van het beton af. Omdat hoge-sterkte beton zeer snel verhardt, treedt de autogene krimp ook heel snel op. Dit is een factor die bij het construeren, zoals later zal blijken, niet mag worden veronachtzaamd. Het fenomeen autogene krimp werd geanalyseerd in de dissertatie van E. Koenders [4].

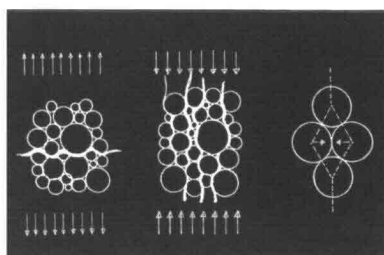
Een ander interessant onderzoek betrof het afschuifgedrag van liggers. Figuur 3 toont een deel van een kokerligger, algemeen toegepast voor de bouw van bruggen. Hoge-sterkte beton lijkt een zeer interessant materiaal voor het gebruik in voorgespannen bruggen: door de hoge sterkte kan de lijfdikte sterk worden gereduceerd, waardoor het gewicht van de brug afneemt, de mootlengte langer kan worden en de bouwsnelheid kan worden verhoogd.

Minimalisatie van de lijfdikte betekent echter dat men op zoek is naar de grens van de mogelijkheden van het materiaal, en daarom is grondige kennis van het gedrag vereist. In op afschuiving belaste gebieden van een brug vormen zich meestal afschuifscheuren onder hoeken van ongeveer 45° . Bij verdere belasting treedt rotatie van de drukdiagonalen en de vorming van nieuwe scheuren, onder een kleinere hoek, op. Een belangrijke vraag is of dit bij hoge-sterkte beton ook zo is. Door het doorscheuren van de toeslagkorrels zijn de scheurvlakken relatief glad, zodat het de vraag is of de rotatie van de drukdiagonalen inderdaad optreedt. Om dit te onderzoeken is een serie proeven op beton met hoge sterkte uitgevoerd, [5].

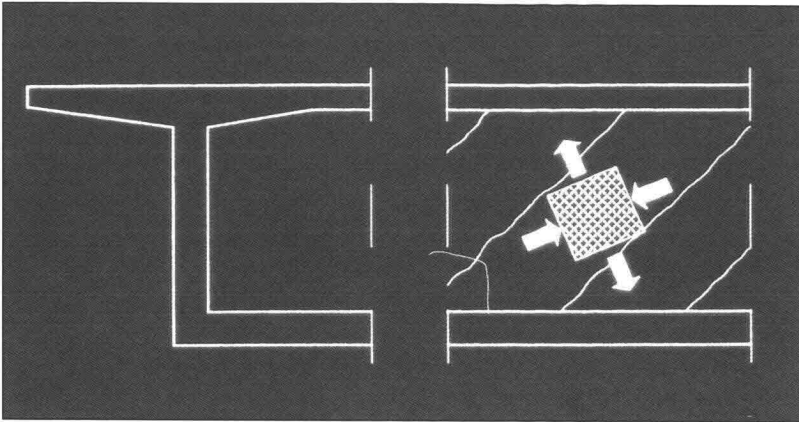
Het resultaat van de proevenserie was verrassend. Rotatie trad in dezelfde mate op als bij gewoon beton. De verklaring ligt in het fenomeen scheurruwheid. Weliswaar was, op kleine schaal, de scheurruwheid door het doorscheuren van de korrels verminderd,



FIGUUR 2A: Krachtoverdracht in op druk belast beton.



FIGUUR 2B: Krachtoverdracht in op trek belast beton.



FIGUUR 3: Spanningsherverdeling in het lijf van een kokerliggerbrug.

maar op grotere schaal trad een ander verschijnsel op, dat deze terugval compenseerde. Een scheur is namelijk nooit helemaal recht: zij vertoont een aantal natuurlijke sprongen en knikpunten. Ter plaatse van deze punten ontstonden contactvlakken waarover grote krachten werden overgedragen. Het herverdelingsvermogen (diagonaalrotatie) bleek daarom in dezelfde mate bij elementen uit hoge-sterkte beton op te treden. Het werk van CUR-Commissie C86 'Hoge-sterkte beton' leidde in 1994 tot Aanbeveling 37. Daarmee werd de mogelijkheid geboden op basis van een uitgebreide versie van de VBC te ontwerpen in beton tot een sterkteklasse van B105.

VERKENNING VAN MOGELIJKHEDEN

Een goede mogelijkheid om afstudeerders praktijk-relevant onderzoek te laten uitvoeren, is door hen onder te brengen bij bedrijven. Afstudeerders van de Sectie Betonconstructies TU Delft worden op diverse plaatsen gehuisvest. Gastheer zijn onder andere RWS (Tilburg, Zoetermeer), Holland Rail Consult, TNO, Ballast Nedam, Heijmans, HBG, D3BN en Witteveen & Bos. Als student onderzocht A. Plagmeijer, in het kader van zijn afstudeerstage bij RWS-Tilburg, de mogelijkheid een betonnen boogbrug toe te passen bij het ontwerp voor de nieuwe brug bij Vianen [6]. Betonnen boogbruggen zijn reeds langdurig uit de gratie, omdat een forse bekistingsconstructie nodig is en omdat de stortoperatie ook niet eenvoudig is. Plagmeijer ontwierp voor het beschouwde geval, waarbij de overspanning 165 m is en de breedte tussen de bogen 28,5 m, een betonnen boogconstructie in beton B80, en vergeleek deze met een ontwerp in B45. Een boog uit B80 is 27% lichter dan een boog uit B45. Hierdoor ontstaat de mogelijkheid de brug in de uiterwaarden op steiger te maken en het skelet op pontons in te varen. Het gewicht van de geprefabriceerde boogdelen kan worden beperkt van 100 tot 70 ton. Verder is de detaillering van de wapening eenvoudiger. In plaats van $2 \times 14 \phi 40$ kan $2 \times 16 \phi 25$ worden toegepast.

Het alternatief werd door RWS bij de keuze van het ontwerp voor de brug Vianen meegenomen en belandde nipt op de tweede plaats. Waarschijnlijk kan nog meer aan gewicht worden bespaard door nog hogere betonkwaliteiten toe te passen. In de tijd dat deze studie werd gemaakt was hoge-sterkte beton nog in ontwikkeling. Een kwaliteit B80 werd als 'in elk geval haalbaar' beschouwd. Momenteel weten we dat ook hogere sterkten mogelijk zijn (tot B105).

Een ander afstudeerder, Wagenaar [7], voerde een studie uit naar de toepasbaarheid van hoge-sterkte beton in plaatviaducten. Plaatviaducten zijn in Nederland het meest

voorkomende viaducttype. De studie toonde aan dat hoge-sterkte beton aantrekkelijk is als er opritten nodig zijn. Het toepassen van hoge-sterkte beton in combinatie met sparringbuizen is een zeer goed alternatief voor het kokerviaduct, [7].

OP WEG NAAR EEN GROTERE TOEPASSING Gezien de voortgeschreden stand der techniek en de veelbelovende studies naar de toepasbaarheid, besloot RWS het initiatief te nemen tot de realisatie van een grote voorgespannen brug uit hoge-sterkte beton. In een vergadering op 7 oktober 1993, onder voorzitterschap van ir. G.H. Krielaart, waarbij vertegenwoordigers van TU Delft en de betonmortelindustrie aanwezig waren, werden de mogelijkheden afgetast. Hoge-sterkte beton leek goede perspectieven te bieden. Anderzijds was er ook scepsis, vooral bij een aantal hoofduitvoerders van RWS die de vergadering bijwoonden: waarom getracht in het werk een B85 te maken als het maken van een B45 al zo moeilijk is? Zo was hun redenering. Er waren echter ook andere vragen, zoals:

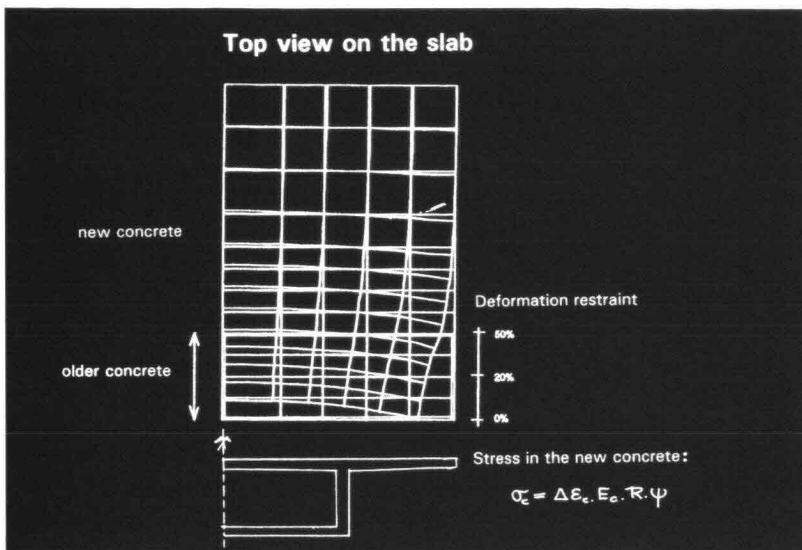
- Is het mogelijk in de betoncentrales een beton te maken die na 28 dagen een karakteristieke sterkte van 85 N/mm² en na 56 dagen een sterkte van 95 N/mm² heeft?
- Is het mogelijk deze beton een zodanige consistentie te geven dat onder een helling van 1:7 (onderflens hamerstuk) zonder bovenbekisting kan worden gestort?
- Is het mogelijk deze beton zo samen te stellen dat in de verhardingsfase geen scheuren ontstaan?

Besloten werd een praktijkproef uit te voeren, waarin het storten van een deel van de kokervormige doorsnede kon worden gesimuleerd. Aan de TU Delft werd een analyse naar de kans op scheurvorming uitgevoerd [9]. Aangetoond werd dat met het beschouwde mengsel (50% Portlandcement en 50% Hoogovencement, om de warmteontwikkeling te verminderen) het scheurvrij houden van de doorsnede goed mogelijk was. De observaties bij de praktijkproef bevestigden dit.

De resultaten van de proef namen veel scepsis weg en de weg leek vrij naar een meer grootschalige toepassing. Er werd besloten nog een tussenstap te nemen: de uitvoering van een 80 m lang viaduct in hoge-sterkte beton, bij Burgerveen in de nabijheid van Schiphol. Deze brug is een uit drie overspanningen bestaande massieve plaatbrug met een dikte van 0,75 m en een totale lengte van 82 m. Er werd uitgegaan van een betonsterkteklasse van B85. Ook bij dit project werd aan de TU Delft een analyse van het verhardingsgedrag uitgevoerd. Met het rekenprogramma Tempspan werd de ontwikkeling van de betonsterkte vergeleken met de ontwikkeling van de optredende temperatuurspanningen.

Voor de te storten brug werd uitgegaan van een omgevingstemperatuur van 20±5°C, die plotseling tot 10±5°C daalt. Deze aanname lijkt conservatief, maar deze omstandigheden traden verrassenderwijs werkelijk op. Zoals in de berekening was aangetoond, trad geen scheurvorming op. Interessant was nog de eis van RWS dat op het werk een betontechnoloog met minstens vijf jaar ervaring met hoge-sterkte beton aanwezig zou zijn. Slechts één persoon in Nederland voldeed aan deze eis, namelijk E. Horeweg, werkzaam bij de sectie Betonconstructies aan de TU Delft. Overeengekomen werd dat deze tijdelijk zou worden uitgeleend. Ook dit project werd een succes.

Gesterkt door deze ervaringen werd besloten over te gaan tot het uitvoeren de bouw van de Tweede Stichtse Brug, met een hoofdoverspanning van 160 m. Gekozen werd voor een betonkwaliteit B85. De variant in beton B85 kreeg de voorkeur boven varian-



FIGUUR 4: Vervormingen van beton tijdens het verhardnen.

ten in lichtbeton B45 en normaal beton B65. Weliswaar is hoge-sterkte beton qua materiaal duurder dan de andere betonsoorten, maar het geeft een aantal voordelen waardoor toepassing uiteindelijk toch economisch is. Deze voordelen zijn:

- besparing aan beton
- besparing aan voorspanstaal
- minder voorspanverliezen
- snellere bouw
- grotere duurzaamheid

Voor dit laatste aspect geldt wel een voorbehoud: het rijdek moet wel ongescheurd blijven. De chloriden uit dooizouten zouden anders via een scheur het voorspanstaal kunnen bereiken en daar corrosie kunnen veroorzaken.

Bij de Sectie Betonconstructies werd daarom een uitgebreide analyse verricht naar het verhardingsproces van het beton in de Tweede Stichtse Brug. Hierbij werden numerieke simulaties uitgevoerd, die uitgebreid werden ondersteund door experimenteel onderzoek [11,12].

Een grote bron van zorg was het thema 'jong aan oud'. Dit betrof de uitbouwmethode van de brug, waarbij steeds nieuwe moten van 5 meter aan oude moten zouden worden vastgestort. Het oude beton is reeds verhard als het nieuwe beton hiertegenaan wordt gestort. Als het nieuwe beton begint te verhardnen, komt hierbij warmte vrij: de temperatuur kan zelfs oplopen tot 65°C. Zodra het beton een zekere sterkte heeft ontwikkeld, begint de afkoelingsfase; het nieuwe beton begint hierdoor te krimpen, wat door het oude beton gedeeltelijk wordt verhinderd. Hierdoor ontstaan trekspanningen in het nieuwe beton die tot scheurvorming zouden kunnen leiden. Dit gevaar wordt nog versterkt door het optreden van autogene (verhardings)krimp, die speciaal bij hoge-sterkte beton aanzienlijk is.

Met het programma Tempspan werden de verhinderde vervormingen, optredend in de verhardingsfase, berekend. Figuur 4 toont een beeld van de vervorming van een deel van de bovenflens na het aanstorten van een nieuwe moot [11,12]. De maximale vervormingsverhindering is 50%. Nu is het berekenen van de temperatuurontwikkeling met

vrij grote nauwkeurigheid uit te voeren. Gaat men uit van lineair elastisch materiaalgedrag, dan geldt dit ook voor de rekken. Het is echter de kunst om van rekken op spanningen te komen, omdat er een aanzienlijke spanningsrelaxatie kan worden verwacht. Naar dit onderwerp is aan de TU Delft uitgebreid onderzoek verricht.

Dit onderzoek werd uitgevoerd met een stuurbaar meetframe. Tijdens het verharderen kunnen diverse graden van vervormingsverhinderend worden ingesteld. Ook kan in elke fase van de verharding de treksterkte en de elasticiteitsmodulus worden bepaald. Deze gegevens zijn van cruciaal belang om een betrouwbare uitspraak over de scheurwaarschijnlijkheid te kunnen doen. Ook in dit geval werd weer gerekend met een plotselinge afkoeling van de buitenlucht met 10°C. De berekeningen toonden aan dat, onder de aangenomen conservatieve randvoorwaarden, een kleine kans op scheurvorming bestaat. Hiertoe werd een adequate wapening aangebracht, die in dit geval de scheurvorming tot zeer fijne scheurtjes zou beperken.

In werkelijkheid traden de extreme randvoorwaarden, zoals in de berekening aangenomen, niet op. Het brugdek is ongescheurd gebleven, tot verbazing van een aantal Duitse professoren, die uitgenodigd waren om de resultaten met eigen ogen te aanschouwen.

Het bezoek van de Duitse delegatie had een bijzondere achtergrond. Ook aan een aantal Duitse universiteiten was onderzoek uitgevoerd naar hoge-sterkte beton en was een aanbeveling voor het construeren opgesteld, in dit geval geldig tot beton B115. De Duitse autoriteiten stonden de bouw van een brug echter niet toe, omdat met het nieuwe materiaal veel te weinig ervaring zou bestaan. Op de Stichtse brug werd daarom een aantal gezagsvertegenwoordigers in combinatie met een aantal Duitse professoren uitgenodigd. De professoren kwamen allen, maar de gezagsdragers kwamen niet of lieten zich door lagere ambtenaren vertegenwoordigen. Er bleek een duidelijke kloof te bestaan tussen kennisaanbieders en kennisafnemers.

Dit laat zien dat de wijze waarop de invoering van nieuwe kennis in de praktijk gestalte krijgt een zeer belangrijke factor is. In Nederland waren, vanaf het begin van de ontwikkeling van hoge-sterkte beton, potentiële gebruikers, zoals aannemers, RWS en adviesbureaus, in de studietoelagen aanwezig en dachten actief mee. Zodoende werd hoge-sterkte beton 'iedereens product' en was voor het invoeren van het nieuwe materiaal in de praktijk een groot draagvlak voorhanden. Ook in dit geval kreeg het 'poldermodel' dus buitenlandse bijval.

NIEUWE ONTWIKKELINGEN In Frankrijk, in de onderzoekslaboratoria van Bouygues, is inmiddels een beton ontwikkeld met een sterkte die nog aanzienlijk hoger is dan de sterkte van de in dit artikel besproken beton. Bij de fabricage van dit 'ultra hoge-sterkte beton' wordt een aantal bijzondere principes gehanteerd:

- Er is sprake van een optimale korrelpakking, onder andere door het toevoegen van reactieve poeders.
- De maximum korreldiameter is slechts 1 mm.
- Er wordt minder water aan het mengsel toegevoegd dan nodig voor volledige hydratatie. Er is dus geen vrij water in het beton aanwezig dat tot vochtgradiënten en microscheurvorming kan leiden. Het niet-gehydrateerde cement werkt als fijne vulstof ter verhoging van de materiaalhomogeniteit.
- Toevoeging van fijne vezels (lengte 13 mm en dikte 0,15-0,20 mm, volume aandeel tussen 1,5 en 3%) zorgt voor ductiliteit.

Zonder bijzondere maatregelen wordt zo een beton verkregen met een kubusdruksterkte tussen 170 en 230 N/mm², een buigtreksterkte tussen 30 en 60 N/mm², een E-modulus tussen 50.000 en 60.000 N/mm² en een breukenergie tussen 20.000 en 40.000 J/m². Door het beton tijdens het hydrateren te verhitten en/of onder druk te laten verharden, kan de sterkte nog verder worden opgevoerd. Pierre Richard, hoofd van de onderzoeksfelding van Bouygues, claimt dat druksterkten tussen 500 en 800 N/mm² gehaald kunnen worden [13]. In haar afstudeerwerk, uitgevoerd bij de Bouwdienst Rijkswaterstaat Tilburg, ging Gisela van Blokland na wat de mogelijkheden van dit materiaal in de bruggenbouw zouden kunnen zijn. Een interessante toepassing bleek de uitbreiding van bestaande viaducten, zonder dat de fundering substantieel moet worden aangepast. De verbreding zou gebruikt kunnen worden als extra rijbaan, als fietspad of voor andere toepassingen, zoals een Light Rail-systeem of Combi-Road (geautomatiseerd goederenvervoer) [14].

Aardig om te weten wellicht is dat Gisela met haar afstudeerontwerp in 1997 de 10.000ste Delftse civiel ingenieur werd. Ze ontving haar diploma uit handen van minister Jorritsma.

CONCLUSIES

- Van beton met hoge sterkte is voldoende bekend om er verantwoord mee te kunnen construeren
- Hoge-sterkte beton biedt voor de bruggenbouw interessante voordelen, zoals besparing aan materiaal, geringere tijdsafhankelijke vervormingen, geringere voorspanverliezen, hogere bouwsnelheid en grotere duurzaamheid
- Een innovatief klimaat vereist de participatie van zowel kennisontwikkelaars als kennisgebruikers in een vroeg stadium van elke nieuwe ontwikkeling.

NOTEN

- 1 Bruggeling, A.S.G., 'Het gedrag van betonconstructies', Deel A, 1981.
- 2 Han, N., 'Time dependent behaviour of high strength concrete', Dissertatie TU Delft, 25 nov. 1996.
- 3 Walraven, J.C., Han, N., 'Krimp en kruip van beton met hoge sterkte', Rapport 25.5-95-2, juli 1996.
- 4 Koenders, E.A.B., 'Simulation of volume changes in hardening cement-based materials', Dissertatie TU Delft, 23 sept. 1997.
- 5 Stroband, J., 'Shear capacity of high strength concrete beams with shear reinforcement' Progress in Concrete Research, Vol. 5, 1997, blz. 87-96.
- 6 Plagmeijer, A.P.M., van der Veen, C., Walraven, J.C., Kaptijn, N., 'Betonnen boogbrug komt terug in Nederland', Cement 1993, nr.4, blz. 22-25.
- 7 Wagenaars, P., Kaptijn, N., van der Veen, C., 'Hoge-sterkte beton in plaatviaducten? Een verkennende studie', Cement nr. 6, Juni 1996, blz. 20-27.
- 8 Kaptijn, N., Krielaart, G.H., 'De Tweede Stichtse Brug', Cement 1994/6, blz. 13-19.
- 9 Koenders, E.A.B., 'Experimenteel en numeriek onderzoek naar de kans op scheurvorming tijdens het verhardingsproces', Stevinrapport, April 1994
- 10 Kaptijn, N., Klijn Velderman, F.G., van der Marel, A.P., Plagmeijer, A.P.M., 'Eerste HSB-Viaduct in Nederland' Cement 1996/9, blz. 52-58.
- 11 Veen, C. van der, Koenders, E.A.B., Kaptijn, N., 'Thermal cracking in a cantilever bridge made of HSC', Computing in Civil Engineering, blz. 892-898.
- 12 Koenders, E.A.B., 'Experimenteel onderzoek naar de spanningsontwikkeling tijdens de vroege fase van het verhardingsproces', Stevin-Rapport nr. 25.5-96-3, maart '96.
- 13 Richart, P., 'Reactive Powder Concrete: a New Ultra High Strength Cementitious Material', 4th International Symposium on Utilization of High-strength/High-performance concrete, Paris 1996, Proceedings Vol. 3, blz. 1343-1349.
- 14 Blokland, G. van., 'Verbreding van viaducten in beton van reactief poeder', Afstudeerverslag Sectie Betonconstructies, TU Delft, 1997.

ATOLLEN VOOR

DE NOORDZEEKUST

Klimaatveranderingen en de
ontwikkeling van overall-concepten

J. Kristinsson
26

• • •

Is er nog leven na de Stormvloedkering? Volop, meent de auteur van deze bijdrage, die een uitdagend idee presenteert: leeggemalen, vrijwel onbewoonde atoleilanden voor de kust. De mogelijkheden zijn duizelingwekkend. Windmolens, waterkrachtcentrales en getijmolen zorgen voor energie. Vervuild haven- en rivierslib kan (eindelijk) permanent worden opgeslagen. Grind-, klei- en zandwinning, viskweekvijvers en toeristische attracties zijn mogelijk. Bij extreem hoge waterstand is er een zeewaterbuffer. Atollen als de etalage van ecologisch Nederland. Een verhaal over vakmanschap en baggeren met een grote B.

• • •

De Noordzee en de Noordzeebodem bieden een potentiële kans om de economische, ecologische en technologische expansie van Nederland vorm te geven. Ons continentaal plat omvat 60.000 km². Dat is twee keer het oppervlak van Nederland.

Hier voor de kust is plaats voor de nieuwe provincie Noordzee. Hier, in een etalage van nieuwe technologie en het oude vakmanschap van baggeren met een grote B, kan Nederland 'anno 2000' de wereld laten zien hoe land wordt gewonnen op zee, hoe visgronden uit zee worden gewonnen en de ecologische visteelt wordt geïntensiveerd en hoe overstromingsgevaar wordt overwonnen

Is dit een droom of werkelijkheid? Is dit een rechter- of linkerhersenheftgedachte?

Is het goed formuleren van een probleem de halve oplossing?

Als het de halve waarheid benadert, dan loopt het niet zo'n vaart. We hebben alle tijd. Zolang we rijk zijn, nog niet toegetreden tot de EMU en geldoverschotten hebben voor de HSL tussen Zoetermeer en Amsterdam - kortom nu het nog kan, is het wellicht niet zo onverstandig om Nederlandse jongeren visie en vertrouwen te geven in een maakbare toekomst: door een ecologisch voorbeeldplan in de Noordzee.

ENERGIE-EILAND Als in de Noordzee energie-eilanden met een honingstructuur en een omtrek van 315 kilometer of zelfs 1000 à 2000 kilometer aan gelede ringvormige dijken worden gebouwd en wanneer die worden voorzien van 5500 langzaam draai-

ende poldermolens, kan door leegpompen de zoutwaterspiegel op een laag peil worden gehouden, met een waterval van 50 tot 100 meter ten opzichte van de omringende Noordzee. Waterkrachtturbines, die in de dijken zijn geplaatst, kunnen onafhankelijk van de tijd van de dag, en weer en wind 8500 Megawatt (piekbelasting) elektriciteit opwekken. Dat is gelijk aan de piek in deelelektriciteitsbehoefte van Nederland.

In de eilanden is verder de mogelijkheid tot palingvangst, mosselen en oestercultuur en/of viskwekerijen en/of grind-, zand- en kleiwinning. Met andere woorden: het Noordzeeoppervlak wordt biologisch gezien nauwelijks verkleind. Doordat de eilanden vrijwel onbewoond zijn, zijn extreme dijkhoogten niet nodig. Eens in de pakweg 10 à 25 jaren mogen één of meer eilanden een dijkbreuk hebben zonder noemenswaardige economische schade.

Wel is het mogelijk door strategische locaties van enkele atol-eilanden voor de kust tijdelijk een gedeelte van de Noordzee 2 tot 3 meters te verlagen. Met andere woorden, in de laatste uren voor de watersnood (eens per 200 jaar) kunnen de dijken van de zeer diepe atollen (100 meter) doorgestoken worden, zodat ze in korte tijd vollopen. De bruto oppervlakte van een atol behoeft maar 5 tot 10% te bedragen van het kustwater om een verlaging van 2 tot 5 meter te bereiken. Dit zou in samenwerking met deskundigen goed kunnen worden uitgezocht.

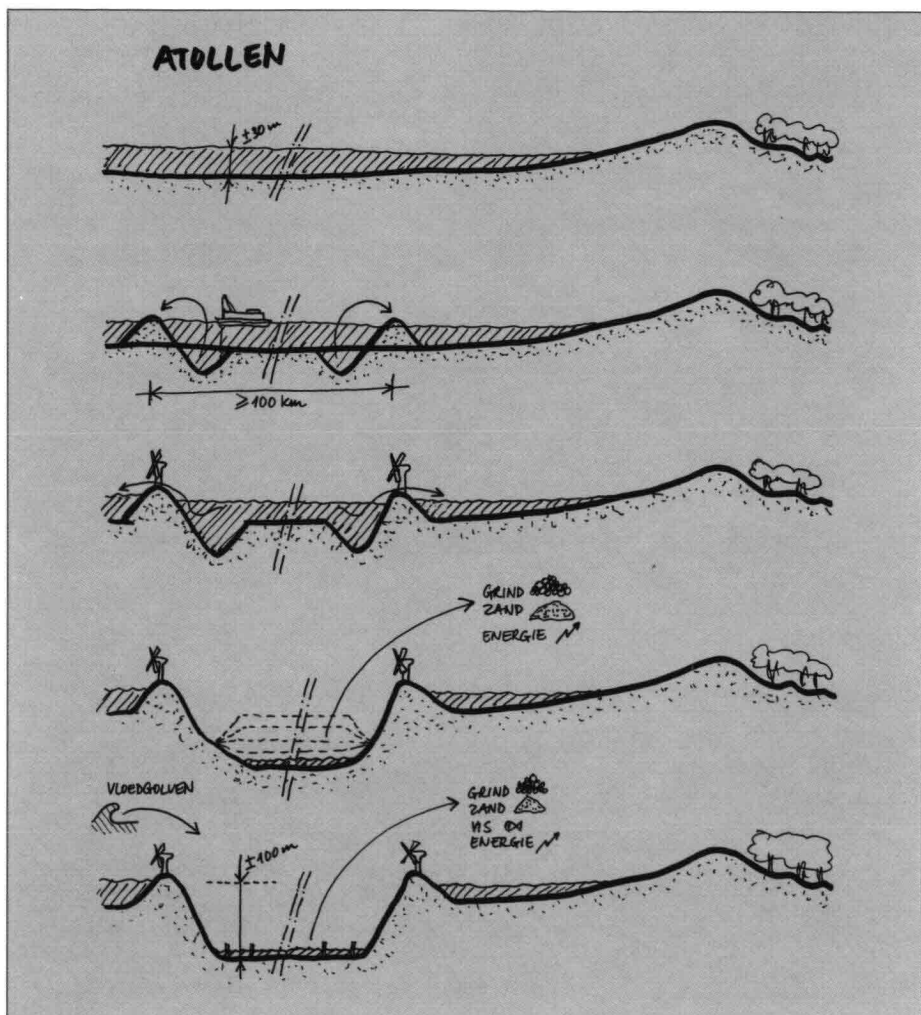
GOLFBREEKWORSTEN Is dit een zuinig alternatief voor dijkverhoging? Waarschijnlijk is het meest juiste antwoord: ja. Maar er zijn andere alternatieven.

Het eerste en goedkoopste alternatief is het ontcrachten van de breekgolven op dijken en duinen. Het basisidee is om piëzo-energie te gebruiken voor vormverandering van golfbrekers, die effectief worden bij golfslag bij hoogwater en westerstorm. Om bij de grote lijnen te blijven, hier wordt gedacht aan grote verankerde waterworsten, parallel aan de kust. Normaliter liggen de dunwandige worsten plat op de ondiepe zeebodem. Bij storm en golfslag worden de piëzobaleinen actief, zetten de geperforeerde worsten zich uit en vullen zij zich nagenoeg helemaal met zeewater. Door keuze van vorm en afmeting na onderzoek wordt de optimale golfbreker gekozen.

MEER FUNCTIES VAN DE ATOLLEN Moeten we voor de toekomst volledig vertrouwen op geheel nieuwe concepten, zoals onbeproeft kernfusie voor energie-opwekking? Of willen we alweer de gulden middenweg kiezen tussen vertrouwde en nieuwe technologie?

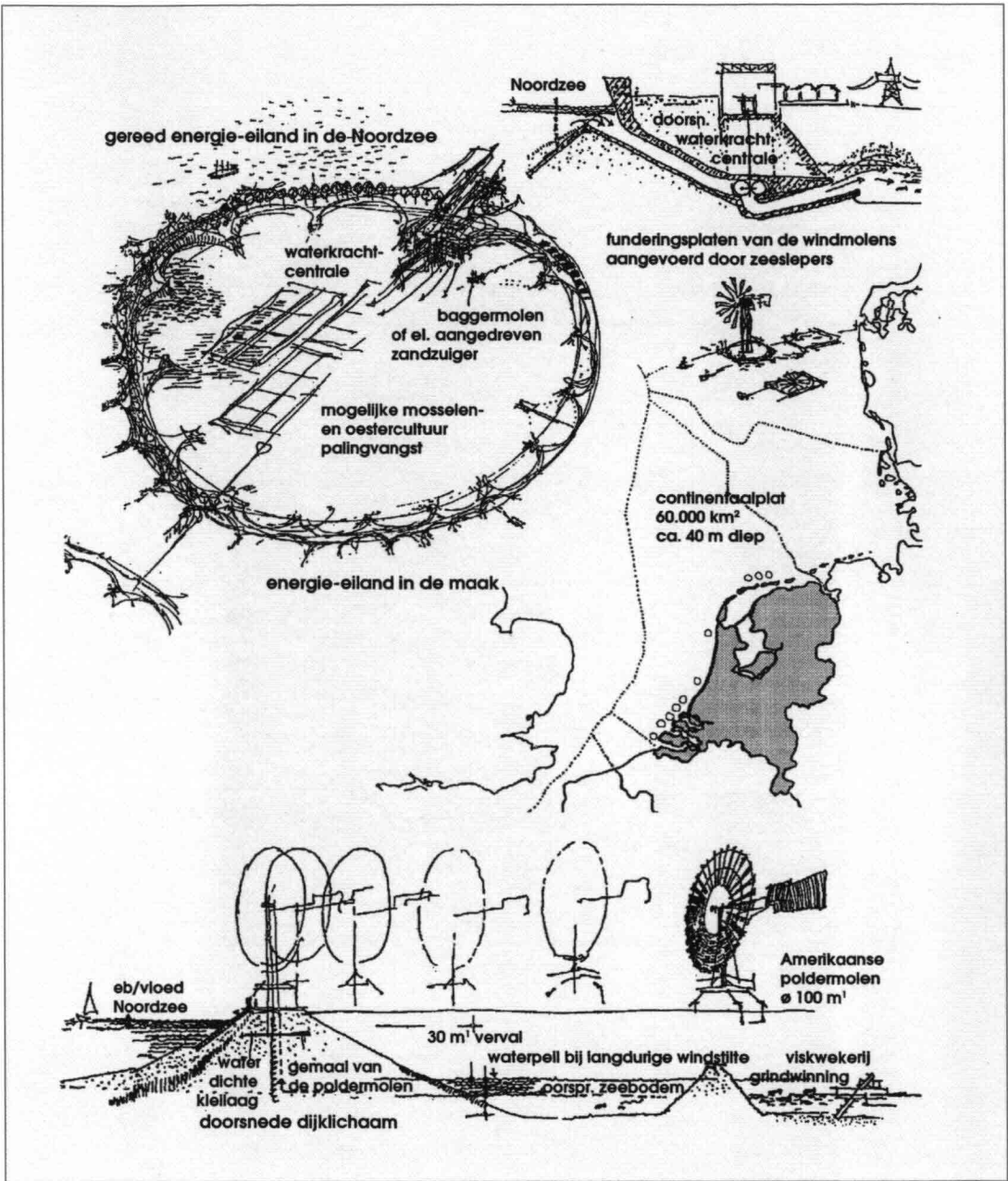
Grondstoffenverbruik is één van de vraagstukken die om een oplossing vragen. Een atoleiland als een multi-purpose energie-eiland gaan we denkbeeldig en visueel opbouwen in de Noordzee voor de Nederlandse kust. De Noordzee doet niet moeilijk. Met een steen aan een touwtje van 10 meter als dieptemeter, kun je bij wijze van spreken van Rotterdam tot de Elbe (Hamburg) varen, en zelfs langs de kust van Jutland tot Funen, zonder land te zien. De grote zeeschepen varen op een 5 mijl beboeide internationale vaarweg met 20 meter vaardiepte op de Noordzee langs de Nederlandse kust. Bij deze denken we in een schaalgrootte die meer dan de Nederlandse territoriale wateren betreft.

Voor een acceptabele oplossing van het eco-energievraagstuk zal men de handen uit de mouwen moeten steken. Zeker als bijvoorbeeld met de gedachte wordt gespeeld om een combinatie te maken van de plannen uit de jaren tachtig van prof.ir. E.F. Boon en ir. L.W. Lievense: 3000 windmolens voor elektriciteitsopwekking langs de Nederlandse kust bouwen respectievelijk een 15 meter verhoogde Markerwaard als kinetische energie opslag gebruiken in combinatie met windmolens.



Circa 3.000 windmolens op de blonde kusten van Nederland waar 8% van de Nederlandse vakantiegangers zich bruin bakt, is echt te veel van het goede. En dan: 15 meter wateropslag bovenop de Markerwaard mag nooit bezwijken, want dan komt er een vloedgolf waarin de Friezen en de West-Friezen kopje onder gaan. Een volk dat de Deltawerken aankant, schrikt niet van grootschalige projecten die ook nog eens in etappes gedurende tientallen jaren kunnen worden uitgevoerd.

VERVUID RIVIER- EN HAVENSLIB Het laatste hete hangijzer van de ecologische realiteit: vervuild rivier- en havenslib dat verwijderd moet worden! Het zou niet goed zijn als een diepe atol niet gebruikt zou worden als een slufteer voor ongewenst verontreinigd sediment. Een halve eeuw niet-onderkennen van zware metalen in rivierslib van de bovenstroomse landen heeft geleid tot een wereldtopper aan vervuild bezinksel in het Ketelmeer. Dat zal te zijner tijd volraken waarna tot veler verdriet het IJsselmeer en de Wadden aan de beurt zullen zijn als vuilopslag. In de voorziene tijd lijkt het onwaarschijnlijk dat het met onder andere zware metalen



vervuilde rivierslib ooit als herwinbare grondstof te boek zal staan. Maar houdt het bij elkaar, waar dan ook. Dat deze atol-slufter volgens Waterman afgedekt kan worden met gebakken klei uit het zware metalen sediment van bijvoorbeeld het Ketelmeer, is een knipoog richting recycling.

Dan het vliegveld in zee voor de kust van Zandvoort. Dat is bij deze mogelijk.

Het kan op zichzelf, maar er zijn voor- en nadelen. Een absoluut nadeel is de locatie in zee, in verband met de grote kans op mist, die het vliegverkeer belemmert. Het is in elk geval geen uitwijkhaven bij slecht weer.

DE KENMERKEN Een samenvatting van mogelijke kenmerken van leeggemalen atoleilanden in de Noordzee ziet er derhalve uit als volgt:

1. Kinetische energieopslag, door atollen droog te malen met windmolens. Hierdoor ontstaat valhoogte ten opzichte van de zeespiegel
2. Elektriciteitsopwekking uit waterkrachtcentrales met een piekvermogen van ca. 8500 Megawatt
3. Grind- en zandwinning uit de Noordzeebodem. Hierdoor neemt in de loop der jaren door meer diepte de energie-opslagcapaciteit toe
4. Zoetwaterwinning voor het wassen van grind en zand
5. Visvijvers voor verschillende vissoorten, ecologisch, hygiënisch, gebaseerd op stromend water
6. Kraamkamers en viskweekvijvers voor de zeevisserij
7. Visvoedingsplaats voor in de toekomst gewonnen eiwitten door middel van algen in riool-afvalveredeling (naar een techniek uit onder andere de Russische ruimtevaart)
8. Als een lege, onbemande zeewaterbuffer bij extreem hoge waterstand (watersnood) bij westerstorm en springtij in plaats van dijkverhoging
9. Uit de getijstroom tussen de atollen kan ook elektriciteit worden gewonnen. Een getijmolen (zie hierna) functioneert als een aan elkaar gebonden lange rij zeilboten, die ondersteboven om twee boeien op de stroom varen
10. Bij het ontwerp van een atol wordt uitgegaan van baggeren bij slecht weer
11. De poldermolens kunnen op pontons worden aangevoerd en eventueel blijven staan voor het onderhoud
12. Atollen - als niches voor (zee)zeilers
 - als functionele vakantie-eilanden
 - als toeristische attractie
13. Permanente opslag voor vervuild haven- en rivierensediment, waar nog niemand de beste oplossing voor weet te vinden
14. Lichtgewicht golfbrekers gebaseerd op piëzo-energie, kunnen automatisch actief worden bij storm en hoogwater

GETIJMOLENS Getijmolens kunnen schone elektriciteit produceren. De aantrekkingskracht van de maan en de zon op de aarde veroorzaakt vier maal daags getijstromen, met een maandelijks cyclus. De getijmolens die we kennen, hebben turbines voor veel zeewater met een laag hoogteverschil. Energie winnen uit het getij zonder stuwmeren kan ook, maar het is moeilijk, omdat de energiedichtheid in de getijstroom

betrekkelijk gering is. Schone energie is zeer gewenst op de gehele wereld. Is het lonend, dan wordt het betaald. In Nederland kost een gasgestookte elektriciteitscentrale 1,6 miljoen per Megawatt vermogen, kolengestookte centrales 2,5 miljoen/MW vermogen. Schone waterkrachtcentrales zonder brandstof mogen 4,0 miljoen/MW kosten. Een getijcentrale en een windmolenpark mogen gelijkgesteld worden aan een waterkrachtcentrale.

Een studie naar getijmolens moet eerst worden verricht, alvorens men kan gaan begroten. Er is uitgegaan van het principe dat een op stroom draaiende getijmolen, plaatselijk de stroomsnelheid van de watermassa kan verminderen.

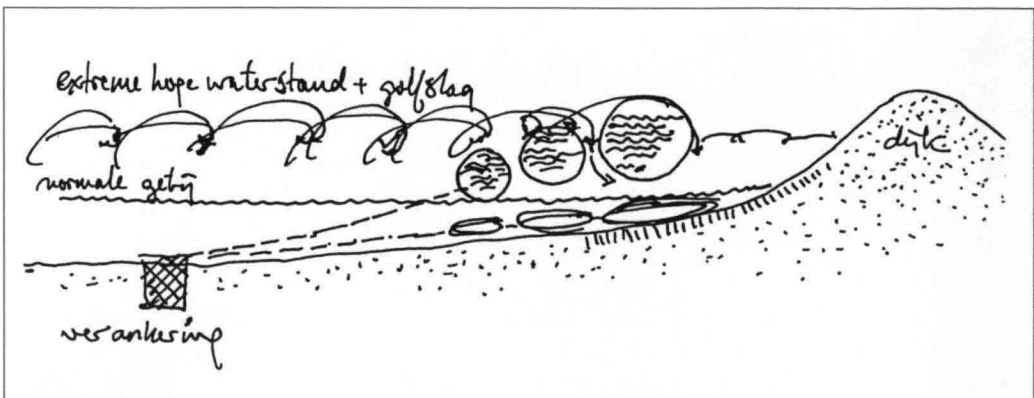
Met primitieve zeilen, dat wil zeggen werkend op weerstand, kan ongeveer vijftien procent van de energie gewonnen worden en met verfijnde zeilen, werkend op lift, globaal de helft. In het laatste geval is 70 meter Noordzee, met een diepte van 20 meter nodig om 1 Megawatt elektriciteitsvermogen te verkrijgen. De elektriciteitsbehoefte in Nederland c.q. geïnstalleerd vermogen, bedraagt circa 15.000 MW. Dus er is 215 kilometer getijmolens nodig, die 70% van de tijd op stroom staan, ofwel ongeveer 300 km getijmolens om geheel Nederland van schone elektriciteit te voorzien. Dit is wel een beetje te veel van het goede, maar 5 à 10 km getijmolens moet kunnen. Aan de hand van proeven moeten de berekeningen worden getoetst.

Het type getijmolens dat ons voor ogen staat, is een energiewand haaks op de stroomrichting, voorzien van staalkabels met zeezeilen die rondvaren tussen energiebakens die uit zee steken, voor turbines en transformatoren. De zeezeilen moeten zó aangetrokken worden dat uit de stroomsnelheid van 5 km/uur, de draaisnelheid van de wielassen uiteindelijk drie omwentelingen per seconde bedraagt, wat past bij een 32-polen-standaardturbine.

Blijft open de vraag of niet elders op de wereld meer ruimte, minder scheepvaart en nog meer behoefte aan schone elektriciteit bestaat: baggeraars, financiers, natte water- en werktuigbouwers kunnen dan hun kennis en ervaring exporteren.

TENSLLOTTE Deze ideeën kunnen Rijkswaterstaat en 'natte' civielen of ingenieurs hopelijk nieuwe inspiratie en een uitdaging bieden voor het leven na de Stormvloedkering. Zeker omdat Nederland anno 1998 op veel gebieden nog lang geen duurzame ontwikkeling heeft bereikt, moet voor de toekomst nog een fors blik oplossingen worden opengetrokken.

Die samenwerking met de makers van dit land gaan we graag aan.



Lichtgewicht golfbrekers - gebaseerd op piezo-energie kunnen automatisch actief worden bij storm en slecht weer.

Op welke plaats in de Noordzee kunnen de Nederlandse atollen het beste worden aangelegd? Prof. J. Kristinsson: "Daar waar de dijken het zwakste zijn, waar je eigenlijk een versterking nodig hebt - zo zuidelijk mogelijk als je op de kaart van Nederland kijkt. Dus zeg maar daar waar de Deltawerken zijn begonnen: voor de deur bij de nu beschermde eilanden van Zeeland. Eventueel zou de aanleg verder zuidwaarts kunnen worden doorgetrokken, tot enigszins over onze grens met België, doorgaand in het kustgedeelte van de buren dus.

Ik denk aan een groep van enige tientallen van deze kunstmatige atoleilanden - dat is voldoende, het gaat om het beoogde effect te bereiken zeker niet om de aanleg van honderden! Om een overloopsituatie te creëren, een soort extra bassin dat bij bepaalde klimatologische omstandigheden de druk op de bestaande dijken of zeekering kan verminderen, is het wel nodig dat de atollen een flinke diameter hebben. Bij de aanleg van zo'n atollengroep moet u denken aan een totaaloppervlakte van tien tot vijftien percent van ons volledige Nederlandse kustwater."

VAN **MAKER** NAAR

REGISSEUR

Een nieuwe rol voor Rijkswaterstaat

H.A.J. de Ridder
27

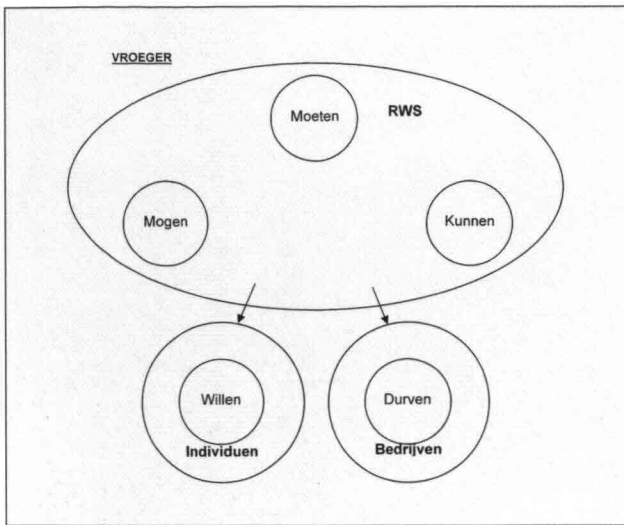
De rol van Rijkswaterstaat verandert de komende decennia ingrijpend. Tot nog toe konden waarlijk grote projecten tot stand komen, doordat Rijkswaterstaat kennis en kunde wist te bundelen in operationele en strategische slagkracht. Dat vermogen brokkelt enerzijds af door de toenemende privatisering en aan de andere kant door de groeiende welstand van de burger. Hoe blijft Rijkswaterstaat een sterk, bepalend instituut? Door zich te beperken tot hoofdzaken en door processen op afstand aan te sturen. De nieuwe rol van Rijkswaterstaat: minder de maker, meer de regisseur van Nederland.

Nederland is wereldberoemd. De laatste jaren om het sociaal-economisch poldermodel. De laatste decennia om het schaatsen en het voetbal. Maar al eeuwenlang is het wereldberoemd om zijn waterbouw.

Voornamelijk komt dit doordat we grote projecten technisch en financieel tot een goed einde kunnen brengen. Een van die projecten is natuurlijk het echte poldermodel, dat wat betreft inspanning en resultaat gerust een wereldwonder mag worden genoemd. Naar mijn smaak is de Nederlandse polder de basis voor de waterbouwkundige faam in het buitenland.

De vraag rijst hoe dat alles tot stand is gekomen. Het is moeilijk vol te houden dat dit uitsluitend voortkomt uit de noodzaak om te overleven in een deltagebied. Dan hadden andere deltalanden ook grote faam kunnen opbouwen. De grote kracht zit mijns inziens in het vermogen om kennis en kunde te bundelen in een operationele en strategische slagkracht. Dááardoor zijn waarlijk grote projecten tot stand gekomen.

Ironisch genoeg is dat vermogen de laatste tijd aan het afbrokkelen. Daarvoor zijn drie factoren aan te geven. Ten eerste is er de toenemende privatisering, in combinatie met het waanidee dat je met een geringer potentieel de regie en coördinatie van het complexe waterstaatkundige werk kunt blijven verzorgen. Ten tweede is er de toenemende complexiteit waarin gewerkt dient te worden, waardoor in potentie grote en aansprekende waterstaatkundige werken onder een reeks van compromissen verworden tot



FIGUUR 1: VROEGER.

middelmatige prestaties. Ten derde is er de individualisering van de burgers, waardoor individuele belangen te veel invloed hebben op de op het algemeen belang gerichte projecten van Rijkswaterstaat.

Deze afbrokkeling dient tot staan te worden gebracht. Het is niet de bedoeling om de factoren hiervoor te bestrijden, zo dat al mogelijk zou zijn. Maar eerder om die factoren als uitgangspunt te nemen voor het formuleren van een visie op het functioneren in de toekomst. Juist in een toekomst die wordt gekenmerkt door enkele waarschijnlijkheden die niet allemaal even gewenst zijn, zoals bodemdaling, zeespiegelrijzing, aanslibbing van rivieren, mobiliteitstoename, groeiende emissies, vervuiling van lucht, water en bodem, toename afval en verdere verstedelijking, is de aanwezigheid van een sterk instituut dat op centraal niveau de vier belangrijke kenniscomponenten (vaardigheid, kunde, inzicht en visie) bundelt, een absolute noodzaak.

Op deze plaats wordt vooral ingegaan op de rol die Rijkswaterstaat in de toekomst zal spelen. Rijkswaterstaat zal de 'maker' blijven van nut- en noodzaakprojecten en de regie blijven voeren bij de private activiteiten rond deze projecten.

Dit wordt hierna uitgewerkt. Eerst wordt uiteengezet hoe traditioneel werd gehandeld. Vervolgens hoe nu in een zekere overgangsfase wordt geopereerd. En tenslotte hoe het uiteindelijk zal worden.

DE TRADITIONELE TAAKINVULLING Rijkswaterstaat werkt al sinds mensenheugenis aan datgene wat noodzakelijk is (moeten), wat collectief wenselijk is (mogen) en wat technisch mogelijk is (kunnen). Deze taak kon lange tijd in redelijke rust worden uitgevoerd. Er was weinig last van individuen (die wat willen) en er was veel gemak van bedrijven (die wat durven). Zowel de individuen als de bedrijven wachtten meestentijds rustig af wat er werd bedacht. De individuen ervoeren een nieuw kanaal of een nieuwe weg nog als een vooruitgang en de bedrijven waren meestal bereid het besteksontwerp tegen scherpe prijzen te realiseren. Een duidelijk beeld, waarbij Rijkswaterstaat de bepalende partij was en de "markt" slechts werd ingeschakeld als de belangrijkste beslissingen al waren genomen. Dit beeld is geschetst in figuur 1.



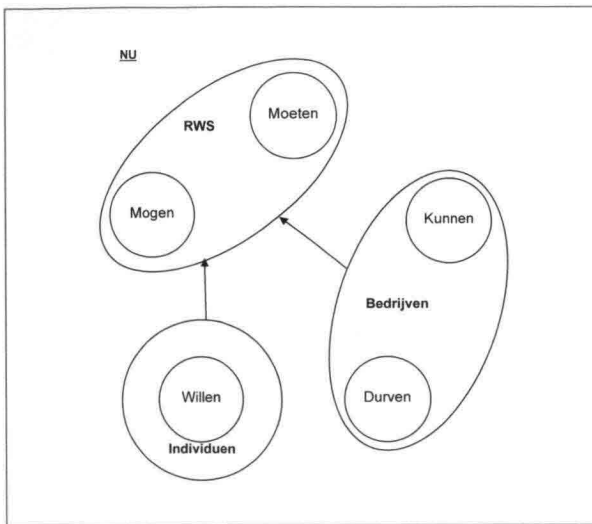
Stolpboerderij bij De Rijp.

DE HUIDIGE OVERGANGSPERIODE Momenteel zitten we in een overgangsperiode waarin het rustige bestaan van Rijkswaterstaat snel aan het veranderen is. Dat gebeurt van twee kanten.

Ten eerste is er een toenemende oppositie tegen zogeheten nut- en noodzaakprojecten. Nut moet hier gelezen worden als collectief wenselijk. Die oppositie komt enerzijds voort uit de toenemende individualisering waardoor mensen geneigd zijn veel meer te kijken naar puur eigenbelang dan naar het collectieve belang. Anderzijds is er de toenemende bevolkingsdichtheid waardoor dit soort projecten complexer worden. Als je in Nederland iets van plan bent kom je nu eenmaal veel tegen. Kortom, de dicht opeengedrukte mens in het laaggelegen, drassige land begint zich te roeren bij welke verandering dan ook. Rijkswaterstaat moet zich niet alleen bezighouden met wat collectief wenselijk is maar ook met wat individueel wenselijk is. Daarbij mag je ervan uitgaan dat ieder individu wat anders wil.

Ten tweede wordt datgene wat mogelijk is allang niet meer bepaald door Rijkswaterstaat. Door privatisering is er bij Rijkswaterstaat een deel van de kennis vervlogen, daar waar marktpartijen zich juist in sneltreinvaart hebben versterkt in kennis. Voor de ingewikkelde projecten wordt het noodzakelijk om marktpartijen reeds in de ontwikkelingsfase, die bepalend is voor het succesvol afronden van het project en dus ook bepalend is voor het risico, in te schakelen. Dat geeft complicaties omdat de rollen, taken, bevoegdheden, verantwoordelijkheden en contractvormen veranderen. De organisatie verandert snel in structuur.

De verandering van cultuur gaat meestal wat trager. Bij het Design & Construct contract van de stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg waren er vooral cultuur problemen bij de betrokken partijen ten aanzien van een verschuiving van het ontwerpwerk:



FIGUUR 2: NU.

Rijkswaterstaat wilde graag maar mocht niet, de aannemer wilde niet maar moest. Geconcludeerd wordt dat Rijkswaterstaat is belast met de ontwikkeling, de realisatie en instandhouding van datgene wat noodzakelijk is doch dat zij met dit soort projecten afhankelijk is van zowel de individuele burger die in grote mate bepaalt wat mag, als van het bedrijfsleven die in grote mate bepaalt wat kan. De huidige overgangsfase is geschetst in figuur 2.

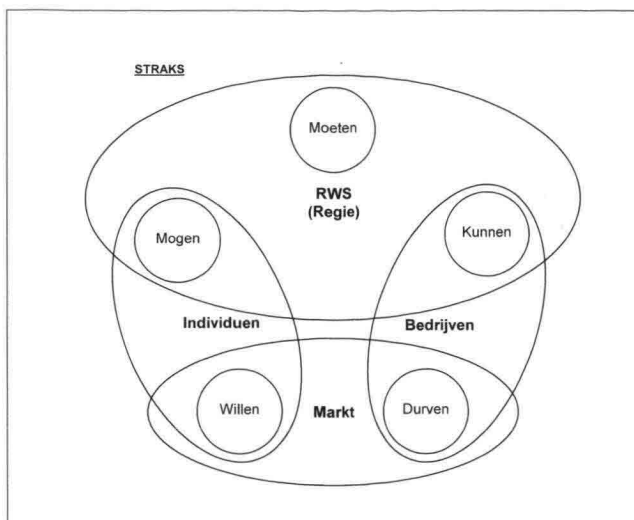
DE TOEKOMST In de toekomst zal er sprake zijn van veel nut en noodzaak projecten waarvoor slechts beperkte middelen ter beschikking staan. Logisch omdat er ook nog ander nuttige en noodzakelijke zaken zoals onderwijs, sociale zekerheid en gezondheidszorg een rol spelen. Dit betekent meestal dat er geen geld wordt uitgetrokken voor inpassing omdat dat lokale problemen zijn.

Inpassing gaat over datgene wat onder, boven of naast het nut-en-noodzaak-project gebeurt. Dit zal bij uitstek het domein worden van individuen en het bedrijfsleven. Zij gaan samen uitmaken wat er van het "kale" nut en noodzaak project te maken valt, gebruiken daarvoor de directe omgeving en doen dat in een "echte" marktsituatie. Dat is de wereld van vraag en aanbod, van consument en producent, van willen en durven.

Zal de "omgeving" worden uitbestede? Niet zonder meer. Daar waar de markt gaat toeslaan liggen allerlei ongewenste zaken op de loer. Het korte termijn denken, dat het marktdenken beheerst, kan leiden tot uitputting, onevenwichtigheid, verloedering en het teloor gaan van niet geld genererende waarden. Daarvoor is het nodig dat de overheid c.q. Rijkswaterstaat bepaalde belangen goed behartigt.

De enige manier om dergelijke projecten tot een goed einde te brengen is een goede samenwerking tussen alle partijen (Rijkswaterstaat, bedrijfsleven en individuen in de omgeving). Vanuit de verschillende belangen wordt in het samenwerkingsverband gewerkt aan een doel: het optimale maatschappelijk nut. Het toekomstige samenwerkingsverband is geschetst in figuur 3.

Een van de belangrijkste voorwaarden voor het samenwerken is dat het bedrijfsleven niet alleen de lusten uit de omgeving mag halen doch ook de lasten uit de omgeving



FIGUUR 3: LATER.

moet dragen. Dit betekent dat er niet alleen geïnvesteerd gaat worden in cashflow genererende waarde, maar ook in waarde die geen cashflow genereert. Dat is nieuw. De manier waarop de risico's verdeeld gaan worden is ook nieuw. De risico's van de realisatie en de exploitatie van het kale nut-en-noodzaak project zullen door Rijkswaterstaat worden gedragen. De risico's van de realisatie en exploitatie van de omgevingswaarde zullen door het te contracteren bedrijfsleven worden gedragen.

Dit alles betekent dat de rol van Rijkswaterstaat zwaarder en anders wordt. Zij houden de zorg voor de realisatie en exploitatie van het nut-en-noodzaak project, doch krijgen er een zware regietaak bij. Deze regisseurstaak bestaat dus uit drie componenten: De zorg voor datgene wat moet. Dat begint bij het signaleren. Vervolgens het aankaarten bij de politiek. Tenslotte de verantwoordelijkheid voor het hele traject van ontwikkeling, realisatie en exploitatie. De zorg voor datgene wat mag. Hier gaat het om de juiste toepassing van de juiste procedures met als belangrijkste taak het bewaken van de zorgvuldigheid. De zorg voor datgene wat kan. Dat geldt niet alleen in financiële zin (contractpartij), maar ook in technologische zin. Rijkswaterstaat zal als geen ander moeten weten wat technologisch mogelijk is.

TENSLLOTTE De rol van Rijkswaterstaat zal in de nabije toekomst fundamenteel veranderen. Voor veel van de zogenoemde nut- en noodzaakprojecten, waarvoor in de landelijke politiek altijd beperkte middelen worden uitgetrokken, zullen marktpartijen worden uitgenodigd om waarde toe te voegen aan de directe omgeving en de lusten en lasten daarvoor te dragen. Dat vereist een sterke regievoering, niet alleen om datgene voor elkaar te krijgen wat moet, maar ook om de markt te behoeden voor eenzijdigheid. Dit betekent dat de structuur en de cultuur van de RWS-organisatie zullen veranderen. Rijkswaterstaat is daar al mee bezig, getuige het interview met directeur-generaal G. Blom in De Ingenieur van 3 juni 1998. Het begin is er, maar er is nog veel te doen. Aan het begin van een nieuw millennium is zo'n uitdagend perspectief voor Rijkswaterstaat mooi meegenomen.

AUTEURSLIJST

- Akker, prof. dr. ir. C. van den**
hoogleraar hydrologie,
faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen / Civiele Techniek
- Angremond, prof. ir. K. d'**
hoogleraar kustwaterbouwkunde,
faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen / Civiele Techniek
- Battjes, prof. dr. ir. J.A.**
hoogleraar vloeistofmechanica,
faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen / Civiele Techniek
- Beek, dr. ir. A. van**
universitair hoofddocent technische mechanica,
faculteit Ontwerp, Constructie en Productie / Werktuigbouwkunde & Maritieme Techniek
- Boon, prof. ir. B.**
hoogleraar scheeps- en offshore-constructie & sterkte,
faculteit Ontwerp, Constructie en Productie / Werktuigbouwkunde & Maritieme Techniek
- Bovy, prof. dr. ir. P.H.L.**
hoogleraar algemene verkeerskunde / wetenschappelijk directeur van de Netherlands
Research School for Transport, Infrastructure & Logistics (TRAIL),
faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen / Civiele Techniek
- Brouwer, prof. ir. R.**
hoogleraar waterbeheer,
faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen / Civiele Techniek
- Enserink, dr. ir. B.**
universitair docent beleidsanalyse,
faculteit Techniek, Bestuur en Management / Technische Bestuurskunde
- Heijden, prof. dr. ir. R.E.C.M. van der**
hoogleraar transportbeleidanalyse,
vice-decaan faculteit Techniek, Bestuur en Management / Technische Bestuurskunde
- Hendriks, prof. dr. ir. Ch.F.**
hoogleraar materiaalkunde,
faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen / Civiele Techniek
- Heuvelhof, prof. mr. dr. E.F. ten**
hoogleraar beleidskunde,
faculteit Techniek, Bestuur en Management / Technische Bestuurskunde
- Hof, ir. A.**
toegevoegd onderzoeker; promovendus waterbeheer, milieu- en gezondheidstechniek
faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen / Civiele Techniek

Holthuijsen, dr. ir. L.H.

universitair hoofddocent vloeistofmechanica,
faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen / Civiele Techniek

Huisman, ir. P.

universitair hoofddocent waterbeheer, milieu- en gezondheidstechniek,
faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen / Civiele Techniek

Jansen, ir. H.

toegevoegd onderzoeker wiskundige analyse van grootschalige modellen,
faculteit Informatietechnologie en Systemen / Technische Wiskunde & Informatica

Jetten, dr. ir. M.S.M.

toegevoegd onderzoeker biokinetiek aan het Kluylaboratorium voor
Bioprocestechnologie,
faculteit Technische Natuurwetenschappen / Scheikundige Technologie

Jong, prof. dr. ir. T.M.

hoogleraar technische ecologie en methodologie, afstudeerrichting stedenbouw,
faculteit Bouwkunde

Jong, drs. W.M. de

universitair docent beleidskunde en internationaal management,
faculteit Techniek, Bestuur en Management / Technische Bestuurskunde

Kristinsson, prof. ir. J.

hoogleraar milieu-technisch ontwerpen,
faculteit Bouwkunde
directeur architecten- en ingenieursbureau

Loosdrecht, dr. ir. M.C.M. van

universitair hoofddocent biokinetiek, verbonden aan het Kluylaboratorium voor
Bioprocestechnologie,
faculteit Technische Natuurwetenschappen / Scheikundige Technologie

Marchau, ir. V.A.W.J.

assistent-in-opleiding,
faculteit Techniek, Bestuur en Management / Technische Bestuurskunde

Meyer, dr. ir. V.J.

universitair hoofddocent stadsontwikkeling,
faculteit Bouwkunde

Molenaar, prof. dr. ir. A.A.A.

hoogleraar infrastructuur en wegbouwkunde,
faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen / Civiele Techniek

Molin, drs. E.J.E.

universitair docent transportbeleid en logistieke organisatie,
faculteit Techniek, Bestuur en Management / Technische Bestuurskunde

Naeije, ir. M.C.

universitair docent satellietssystemen en oceanografische toepassingen, tevens verbonden aan het Delft Institute for Earth-Oriented Space Research (DEOS),
faculteit Luchtvaart- & Ruimtevaarttechniek

Ostayen, ir. R.A.J. van

toegevoegd onderzoeker; promovendus technische mechanica
faculteit Ontwerp, Constructie en Productie / Werktuigbouwkunde &
Maritieme Techniek

Ploeg, mw. dr. ir. M.P.M. van der

universitair docent beleidsanalyse en beleidsvoorbereiding integraal waterbeheer,
faculteit Techniek, Bestuur en Management / Technische Bestuurskunde

Ridder, prof. dr. ir. H.A.J. de

hoogleraar integraal ontwerpen / civiele bedrijfskunde
faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen / Civiele Techniek

Ridder, drs. T.

gemeentelijk archeoloog Vlaardingen

Rientjes, ing. T.H.M.

universitair medewerker waterbeheer, milieu- en gezondheidstechniek
faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen / Civiele Techniek

Roest, dr. ir. M.R.T.

toegevoegd onderzoeker wiskundige analyse van grootschalige modellen,
faculteit Informatietechnologie en Systemen / Technische Wiskunde & Informatica

Sanders, prof. ir. F.M.

hoogleraar infrastructuur,
faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen / Civiele Techniek

Schierreck, ir. G.J.

universitair hoofddocent waterbouwkunde,
faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen / Civiele Techniek

Schuurmans, dr. ir. J.

toegevoegd onderzoeker waterbeheer, milieu- en gezondheidstechniek subfaculteit Civiele Techniek. Thans werkzaam bij de Loughborough University, Dept. of Math. Sc. te Leicestershire.

Stoop, dr. ir. J.A.A.M.

universitair hoofddocent risicobeheersing en veiligheid in transport
faculteit Techniek, Bestuur en Management / Technische Bestuurskunde

Teunissen, prof. dr. ir. P.J.G.

hoogleraar mathematische geodesie en puntsbepaling,
faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen / Geodesie

Thissen, prof. dr. ir. W.A.H.

hoogleraar beleidsanalyse,
faculteit Techniek, Bestuur en Management / Technische Bestuurskunde

Veer, prof. dr. ir. P. van der

hoogleraar civieltechnische informatica
faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen / Civiele Techniek

Verruijt, prof. dr. ir. A.

hoogleraar grondmechanica,
faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen / Civiele Techniek

Vollebregt, dr. ir. E.A.H.

toegevoegd onderzoeker wiskundige analyse van grootschalige modellen,
faculteit Informatietechnologie en Systemen / Technische Wiskunde & Informatica

Vreede, dr. ir. G.J. de

universitair docent systeemkunde, elektronisch vergaderen en groupware,
faculteit Techniek, Bestuur en Management / Technische Bestuurskunde

Vrijling, prof. ir. drs. J.K.

hoogleraar waterbouwkundige kunstwerken en probabilistisch ontwerpen,
faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen / Civiele Techniek

Walraven, prof. dr. ir. J.C.

hoogleraar mechanica & (beton)constructies,
faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen / Civiele Techniek

Wees, mr. K.A.P.C.

assistent-in-opleiding transportbeleid en logistieke organisatie,
faculteit Techniek, Bestuur en Management / Technische Bestuurskunde

Weijnen, mw. prof. dr. ir. M.P.C.

hoogleraar industriële systemen, energie en milieu / programmaleider Delfts Interfacultair
Onderzoekscentrum Ontwerp en Beheer van Infrastructuren
faculteit Techniek, Bestuur en Management / Technische Bestuurskunde

Westland, ir. D.

universitair docent verkeerskunde,
faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen / Civiele Techniek

Philip Broos en Ben Herbergs

zijn hoofd- respectievelijk eindredacteur van de wetenschapsmagazines
Delft Integraal en Delft Outlook.

EINDREDACTIE EN PRODUCTIE Ben Herbergs
m.m.v. Gert van Engelen; TEKST,
Philip Broos; TEKST EN FOTO'S/ILLUSTRATIES

FOTOGRAFIE KLEURKATERNS Jurjen Drenth
FOTO OMSLAG Marc Stender
ART DIRECTION & VORMGEVING SOK, Odette Koldewey
LAY-OUT Sandra van der Putten, EPS Amsterdam
DRUK Calff & Meischke, Amsterdam
REALISATIE Bi Producties, Rotterdam

Dit boek werd uitgegeven ter gelegenheid van het congres Deltakunde -
op oude en nieuwe wegen, gehouden op 11 november 1998 te Delft.

Tegelijk met deze uitgave verscheen in een gelimiteerde oplage Natten & Drogen,
vijf pentekeningen van Len Munnik.

Met dank aan Marcus de Geus, Henri Cormont, Rob van der Laag, ir. Michèle Coëmet,
Rob A. van Iterson, prof. ir. P. Hakkesteegt, ir. Andy van den Dobbelsesteen, Annemarie Rima,
prof. ir. D.H. Frieling, Adeeba Ramdjan, prof. dr. ir. J. de Jong, Simone Wiechels,
Maarten van der Sanden, Linda van Veen, Marja Ouwersloot (secretariaat projectgroep
TUD-RWS200 / faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen).

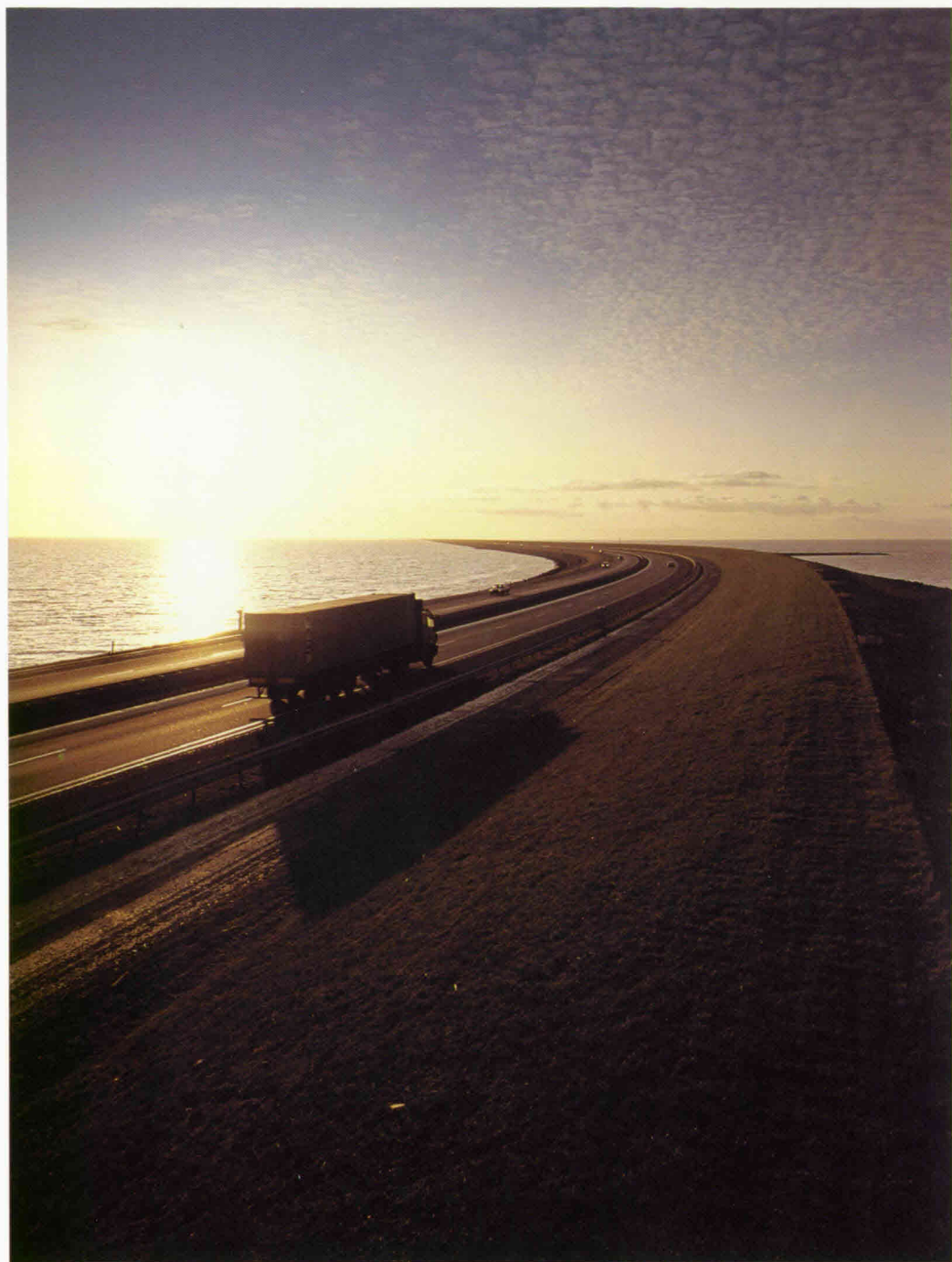
De samenstellers en de redactiecommissie wensen in het bijzonder te bedanken het ministerie
van Verkeer en Waterstaat, het College van Bestuur van de TU Delft en allen bij Rijkswaterstaat
die het afgelopen jaar door hun steun en inspanningen hebben bijgedragen aan de totstandkoming
van dit jubileumwerk.

Een uitgave in opdracht van de Technische Universiteit Delft

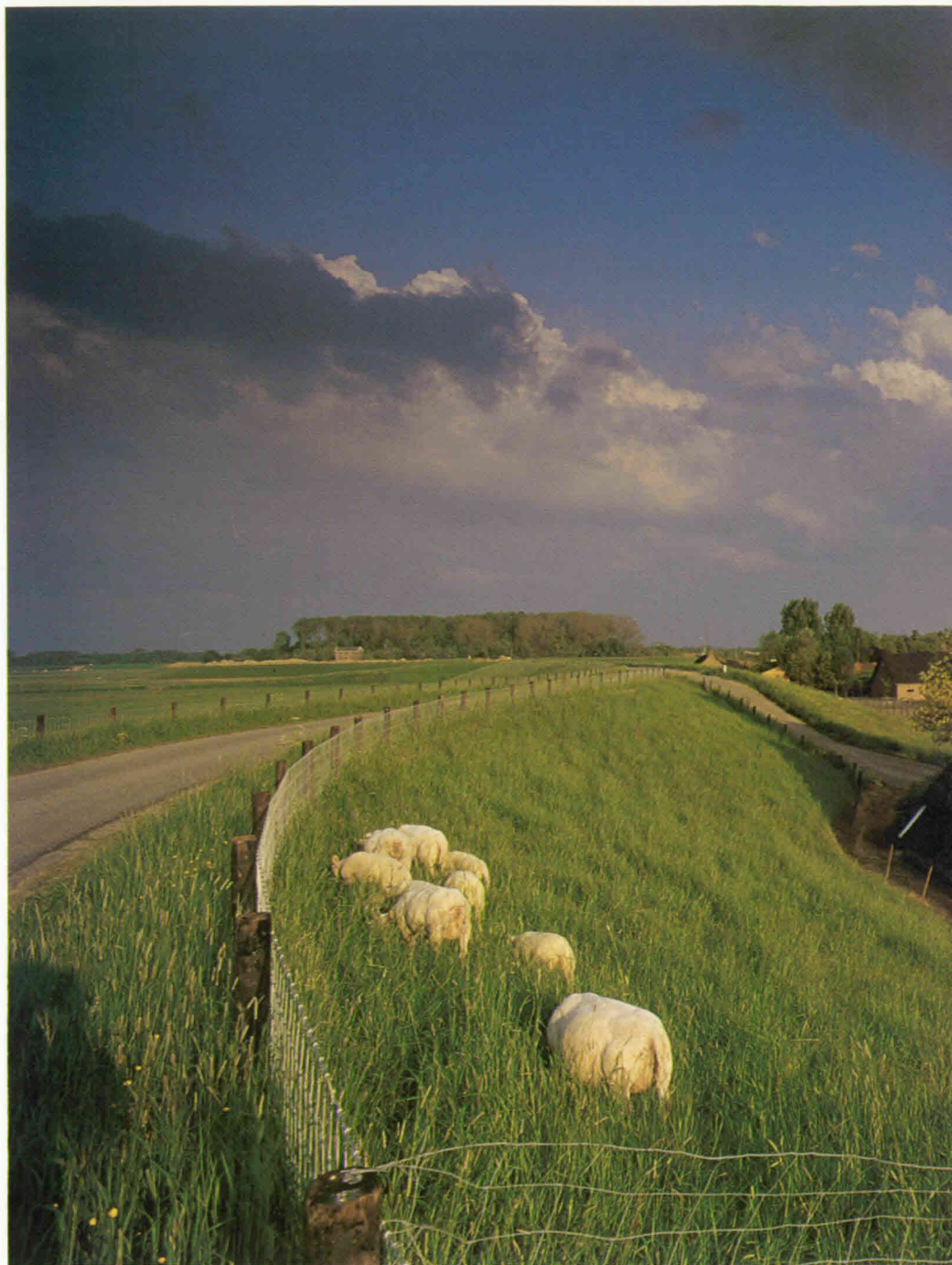
© Hoofdstukken TU Delft / afzonderlijke auteurs
© Concept, idee & samenstelling Bèta Imaginations i.s.m. projectorganisatie TUD-RWS200

© 1998 Bèta Imaginations Publishers, Rotterdam - Alle rechten voorbehouden.

ISBN 90-75961-01-4
NUGI 831



Afsluitdijk.



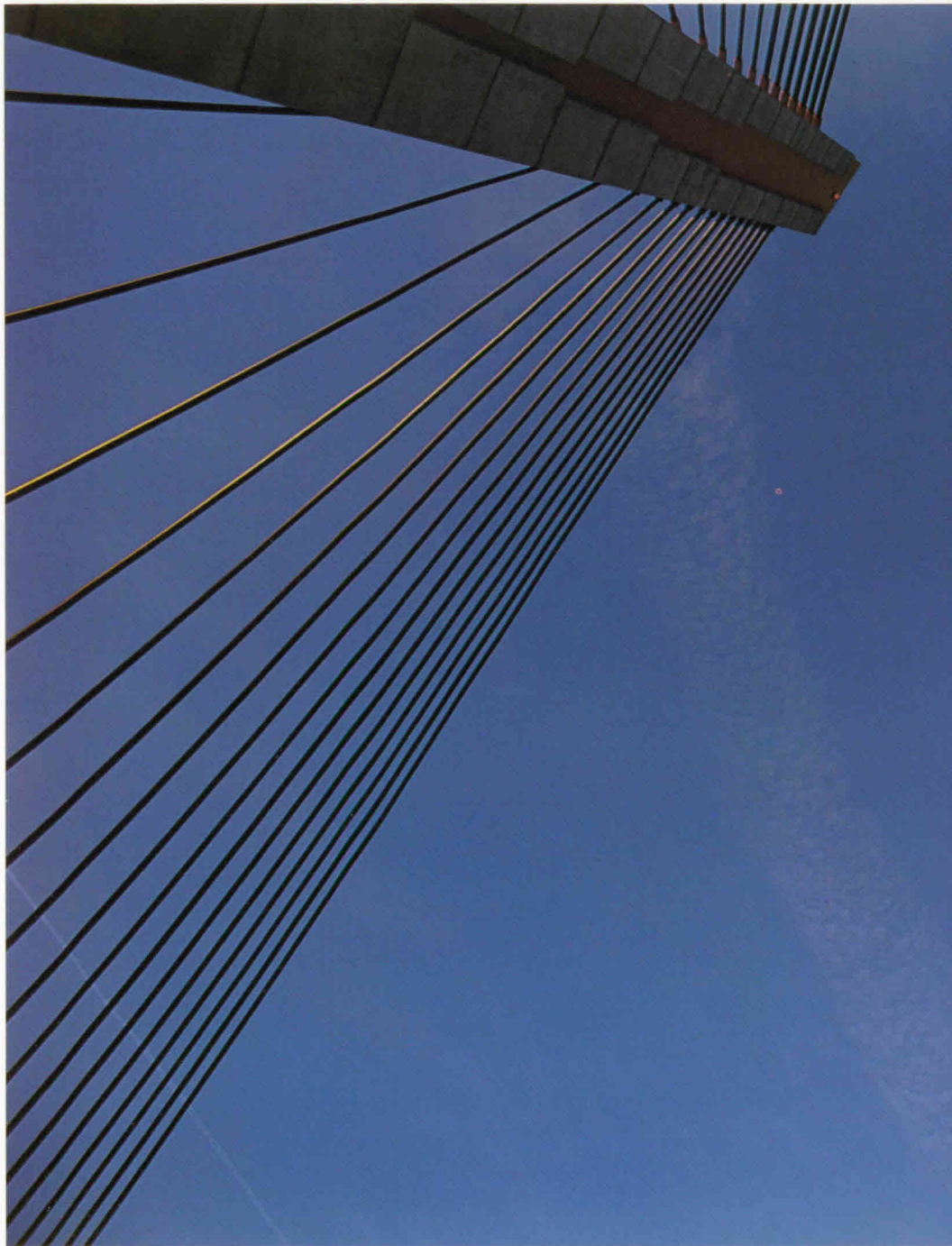
Winssen.





Waddinxveen.





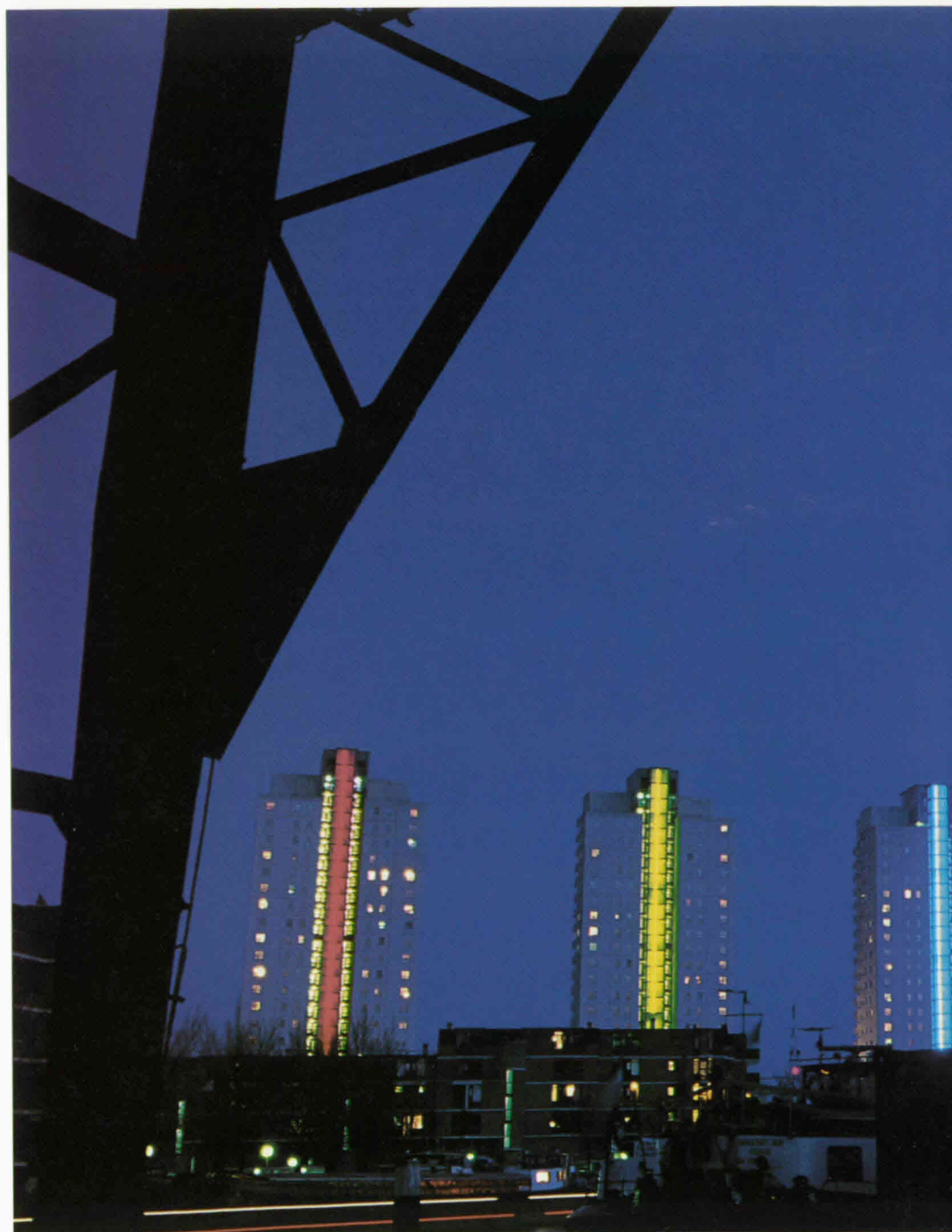
Zaltbommel, nieuwe Waalbrug.





Ijmuiden.





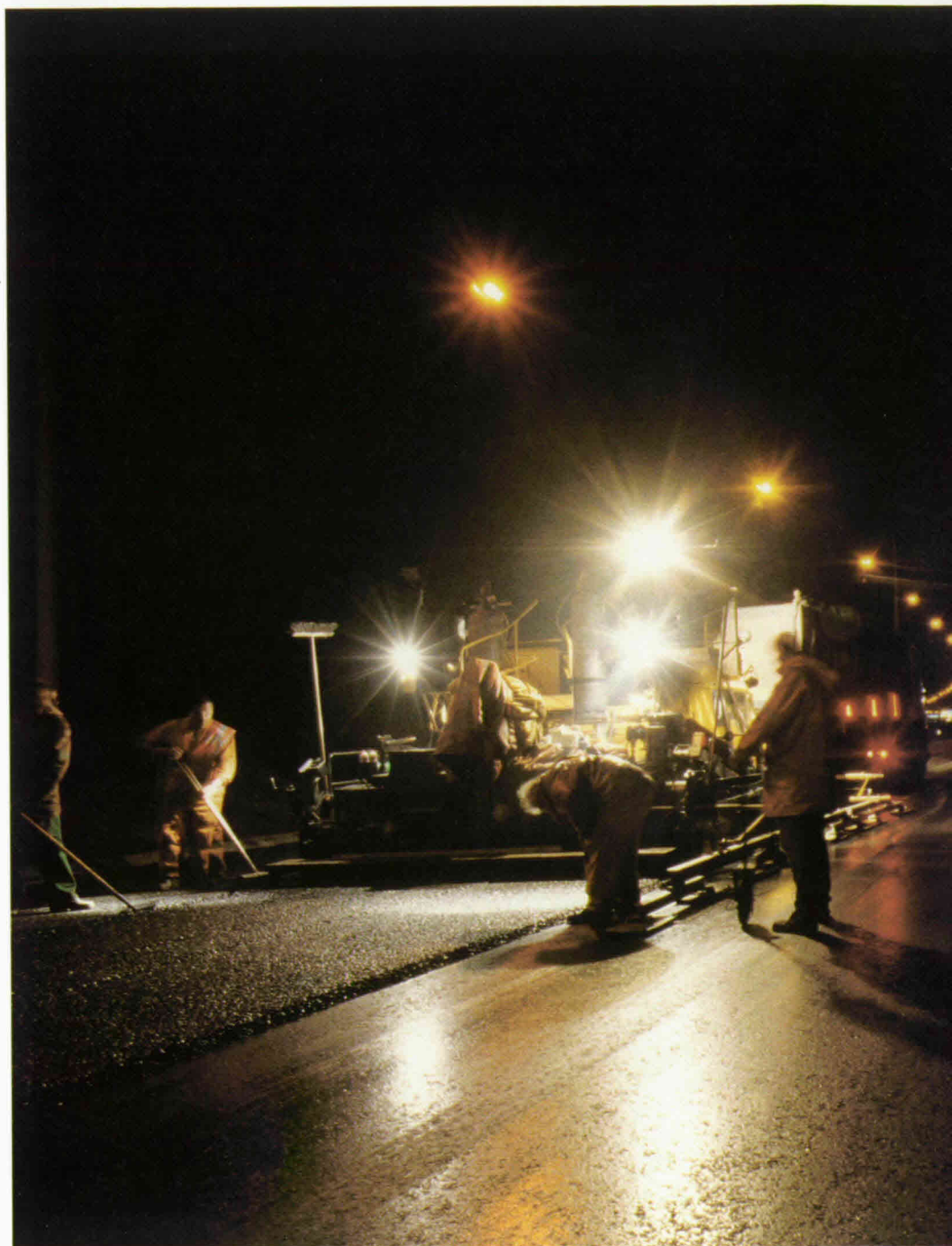
Rotterdam, Maritiem Buitenmuseum.





Schiphol.





Werk aan de weg.





Wijk bij Duurstede.