

Systeemanalyse - enkele perspectieven

Inleiding

De termen 'systeem' en 'systeemanalyse' worden in zo verlerlei verband gebezigd dat verwarring bestaat over hun betekenis en nut.

Dit artikel is bedoeld als verduidelijking van wat 'systeemanalyse in brede zin' genoemd kan worden. De aandacht is gericht op de achtergronden, en op het definiëren van systeembegrippen en systeembenadering. Deze zijn, waar mogelijk, gezien vanuit het gezichtspunt van de civiel ingenieur.



PROF. DR. IR. G. H. TOEBES
Hoogleraar, School of Civil Eng.,
Purdue University, West Lafayette,
Indiana, USA, 47907.
Tijdens 1974-75 gast-hoogleraar
van de Afd. Civiele Techniek,
TH Delft

De 'systeemanalyse in enge zin' met zijn concentratie op statistische, operations research-, en simulatie modellen, wordt niet als zodanig besproken. (Men kan het zien als de analytische gereedschapskist voor systeemanalyse in brede zin). Dit gebied van toegepaste wetenschap kan men nu een duidelijk bewezen en waardevol komplement van de meer traditionele ingenieursaanpak noemen. Volstaan is hier met het geven van een incidentele illustratie en optimalisatie en met het vermelden van enkele tekstboeken die introducties verschaffen tot gebruikelijke analytische methoden. De huidige ontwikkeling van systeem-analyse in brede zin is te zien als een penetratie van natuurwetenschappelijk modelleren in de sociale wetenschappen en vice versa. Hierbij spelen behoeften aan interdisciplinaire samenwerking en de ongemene efficiëntie van wiskundig modelleren en van moderne informatieverwerking een stimulerende rol. Getracht is aan te geven dat voor vele civiel ingenieurs deze ontwikkeling van bijzonder belang is daar het de aangewezen weg schijnt om de kwaliteit van hun vakbeoefening te verhogen. Dit speelt in het bijzonder bij problemen in de publieke sector zoals het water kwantiteits- en kwaliteitsbeheer, het verkeerswezen, en de ruimtelijke ordening.

Wetenschappelijk perspectief

1. Primitieve Systeem begrippen

Een systeem is een soort geheel met een functie. De oude Grieken trachtten hun omgeving rationeel te begrijpen als 'gehelen' wier functie uit hun actie en uiteindelijke staat aangetoond kon worden. Voorbeelden van het z.g. 'teleologische' denken zijn: een steen valt omdat hij bestemd

is zich bij de aarde te voegen aangezien hij 't element aarde bevat; rook stijgt omdat zijn element vuur achter de sterren behoort; enz.

Het resultaat was een toenemend gewrongen oorzaak- en gevolg structuur.

2. Natuurwetenschap en Reductionisme

De opkomst van de natuurwetenschappen trok de teleologisch causaliteitsstructuur omver, doordat veel efficiëntere causaliteiten geformuleerd werden. Deze hadden de vorm: gegeven A, dan B. Dit soort voorspellingen of 'waarheden' kon systematisch worden geproduceerd met de zelf-corrigerende, axiomatisch-analytische 'rationele methode'. De bouwstenen werden verkregen door steeds verdere ontleding of reductie van stukjes fysische werkelijkheid in laboratoria. Het filosofische positivisme poneerde dat steeds verdere reductie leidde tot steeds verfijnder causaliteiten, totdat uiteindelijk de volle werkelijkheid verklaard zou kunnen worden.

Impliciet was de stelling: een geheel kan begrepen worden uit zijn onderdelen dan wel de meest fundamentele relaties, n.l. causaliteiten.

3. Biologie, Psychologie

De effectiviteit van het reductionisme bereikte het eerst duidelijke limieten in de biologie, psychologie, enz. Al veel eerder poneerde het vitalisme dat het leven iets speciaals was (bijv. 'organische' verbindingen). Men onderkende biologische 'eenheden', ieder met een ingebouwd doel of bewustzijn, waardoor een handhaving van evenwicht- of 'homeostasis' van dat geheel kon worden bewerkstelligd. In de psychologie was behoefte aan het systeem-begrip 'gestalt'. De socioloog had begrippen zoals 'natie' nodig, enz.

Impliciet was de stelling: een geheel kan *niet* worden begrepen uit (slechts) zijn onderdelen. Een nieuw begrip was nodig, n.l. 'geheel' of 'systeem'.

Dit geheel dient dan mede begrepen te worden uit de rol, en dus het doel, van de componenten in dat geheel.

De relatiestructuur, en niet de individuele relatie of causaliteit was zodoende van primair belang. Met de gedachte dat systeem gedrag en functie besloten liggen in de relatiestructuur, heeft men in wezen een reintroductie van een teleologisch element.

4. Algemene Systeemtheorie

Het wezenlijke verschil tussen de visies geschetst in 2 en 3 was reeds aangegeven in werk van bijv. Koehler¹ (1938) en Angyal² (1941); het werd definitief geformuleerd door Bertalanffy³ (1950).

Hij stelde dit verschil zorgvuldig vast met de onderscheiding tussen de *gesloten* systeemconceptie (het reductionisme) en *open* systeembeschouwing.

Gas in een gesloten vat kan mentaal en fysisch afgescheiden worden van de rest der werkelijkheid en dan goed (mechanisch) gemodeleerd (Wet van Boyle).

Een kat in een gesloten vat, evenwel, gaat dood. De hiermee beklemtoonde gedachte is dat vele systemen bestaan *dankzij* hun omgeving, niet slechts *in* een omgeving. Voor een in wezen open systeem moet dus de *systeemomgeving* betrokken worden in de studie. Deze fundamentele aanwijzing voor onderzoek werd later in door Bertalanffy (1950) en door Boulding (1956) gestimuleerde aanpakken enigszins verdoezeld. Zij zetten zich in voor het formuleren van een 'algemene systeemtheorie'.

Deze werd gezocht in: a. onderzoek naar analogieën (het isoleren van wiskundige en rationele structuuranalogieën, en van *invarialite* of overdraagbare begrippen); b. axiomatische opbouw van systeemtheorie (het formuleren van begripsdefinities en het deductief gebruik daarvan); en c. abstracte theorieën van structuur (hiërarchische decompositie; topologie; enz.). Momenteel divergeert dit werk. Er is geen unieke axiomatische basis. De praktische toepasbaarheid van algemene systeemtheorie (indien men al van een theorie kan spreken) is gering. In praktijkgebieden met 'systeemproblemen' blijkt eigen uitwerking van grondbegrippen nodig.

5. Systeemdefinitie, -begrippen, -benadering, en -analyse

Kritisch nagaand wat de algemeen aanvaarde kern van vele systeemdefinities is, kan men tot het volgende grondbegrip komen:

een systeem is een *manier* van voorstellen van de werkelijkheid, n.l. als een *groep* van *subsystemen* verbonden door een *relatie structuur* beide gekozen als functie van een '*gestelde vraag*'.

De 'gestelde vraag' is op te vatten als afgeleide doelstelling en fungeert als de uiteindelijke rationeel voor de selectie van subsystemen en relaties. De definitie is recursief en behelst daarmee zowel de open als de gesloten systeembeschouwing.

Een systeem is dus vóór alles een doelmatig denkmodel of ook een doelgerichte organi-

satie van informatie. Alle uitbreidingen van bovenstaande definitie, of dit nu gebeurt in de richting van concrete systemen of begripsmatige systemen, of beide, vertegenwoordigen 'eigen uitwerkingen' van het invariante grondbegrip 'systeem'. Eigen uitwerkingen hebben geleid tot verschillende systeemdefinities en daarmee tot verwarring. De verwarring wordt vergroot indien de uitwerking, in de zin van een klassificatie van systeembegrippen of 'systeemeigenschappen', door elkaar gehaald wordt met 'systeembenadering' (te gebruiken procedures om systeembegrippen nuttig te maken) en 'systeemanalyse' (te gebruiken wiskundige methoden om een systeembenadering tot een rekenkundige oplossing te brengen).

In het formuleren van systeemeigenschappen, -benadering en -analyse speelt de aard van de systemen waarmee een analyst het meest vertrouwd is ook nog een rol. In het werk aan een wetenschappelijk gefundeerde klassificatie is die rol niet altijd duidelijk aanwijsbaar. Zij wordt soms verzwegen om, gebruik makend van minder gefundeerde analogieën, voor het resultaat grotere algemeenheid op te eisen. Met name voor de overdracht van begrippen tussen biologische en technische systemen gebeurde dit.

Mede gezien de ruime, functionele definitie voor het grondbegrip 'systeem' behoeft het geen verwondering te wekken, dat in pogingen tot wetenschappelijke generalisatie men telkens weer op concretiseringsmoeilijkheden stuit. Ook dat er daarmee ruimte blijft voor begripsmatige vaagheden en intellectuele beunhazerij.

Hoewel in bovenstaande systeemdefinitie het systeem als denkmodel wordt benadrukt, zal de term óók gebruikt worden om te verwijzen naar het concrete systeem, welke men met het model tracht aan te geven. Het lijkt niet de moeite waard om overal zorgvuldig onderscheid te maken tussen de verbeelding en het verbeelde. Waar nodig zullen termen zoals watersysteem, verkeerssysteem, enz. en de term systeemmodel worden gebruikt.

6. Klassificatie van structurele systeemeigenschappen

Bij de meer serieuze pogingen om tot wetenschappelijke formulering van systeembegrippen en bijbehorende klassificatie van systeemeigenschappen te komen, staat de 'relatiestructuur' op de voorgrond. Een vruchtbare aanpak is hierbij het definiëren van paren van tegenovergestelde begrippen waartussen men zich overgangsvormen voorstelt. Zonder hier in te gaan op definities, herkomst, gebruik, overlapping en de niet geringe bijbehorende literatuur geeft tabel I enkele bi-polaire naam-paren voor

TABEL I - Enkele twee-polige algemene systeemeigenschappen.

Statisch	versus	Dynamisch
Lineair	versus	Niet-lineair
Deterministisch	versus	Stochastisch
Gekonstrueerd	versus	Natuurlijk
Gedecentraliseerd	versus	Gecentraliseerd
Parallel	versus	Hierarchisch
Gesloten	versus	Open
Structureel	versus	Functioneel
Zonder doel	versus	Doelmatig
Ongereguleerd	versus	Cybernetische
Klein	versus	Groot
Stimpel	versus	Complex
Optelbaar	versus	Verweven

structurele systeemeigenschappen.

De aanpak van (nieuwe) problemen wordt vaak verhelderd door deze te benaderen (uiteraard op geïnformeerde wijze) via systeemstructuur begrippen zoals die (ten dele) zijn aangeduid in Tabel I. Ook zijn zij waardevol in de uitbouw van toegepaste systeembenaderingen en -analyses. Zij kunnen tenslotte nuttig zijn in interdisciplinaire communicatie. Overigens zijn de begrippen in Tabel I te weinig éénduidig en vertonen zij teveel overlap om als basis te dienen voor een axiomatische systeemtheorie. In het volgende zal met een opmerking over drie van de termen worden volstaan.

7. Groot en Complex

Denkmodellen met de drie eerstgenoemde eigenschappen in de rechterkolom van Tabel I zijn vaak het moeilijkst en het meeste geassocieerd met recentelijk ontwikkelde numeriek-analytische methoden. Zij worden dáárom door veel wetenschappelijk geschoolden als de kern van de systeemanalyse gezien. De vereenzelviging van systeemanalyse met analytische modeleigenschappen en -methoden wordt bevestigd geacht met elke verdere toepassing van dynamische niet-lineaire, en/of stochastische modellen op biologische of socio-economische problemen.

Die identificatie is niet (geheel) juist. Als meer karakteristiek voor systeemmodellen kunnen grootte (gegevens bestand; aantal varianten, subsystemen, berekeningen, enz.) en een complex zijn (noodzaak voor interdisciplinair werk) worden aangemerkt. Deze zijn meer direct afhankelijk van de vragen die men stelt. Meer en meer doelen die vragen op een op de 'beste' manier begrijpen of doen van iets gegeven beperkingen, op grotere verbanden, op sociaal belang of doel. Daardoor worden de kwalificaties en inklusiviteit van de 'gestelde vraag' (ofwel uiteindelijke rationeel in de selectie van subsystemen en hun relaties) vergroot. En daarmee gaan probleemgrootte en -complexiteit omhoog.

¹ Koehler, W.: *The place of Values in the World of Fact*, pp. 314-28, Liveright Publ. (1938).

² Anggjal, A.: *Foundations for Science of Personality*, pp. 243-61, Harvard University Press (1941).

³ Bertalanffy, L. von: *The theory of Open Systems in Physics and Biology*, Science Vol III, pp. 23-9 (1950).

8. Doelmatig

De vraag naar 'het beste' behelst de vraag naar de doelmatigheid van systeemmodellen en van de concrete systemen zo verbeeld ten aanzien van de 'gestelde vraag'. De gestelde vragen kunnen over twee klassen worden verdeeld:

- hoe werkt het concrete systeem en waarom?
- gegeven beperkingen: hoe wordt het concrete systeem 'het beste' ontworpen of beheerd?

In de *klasse a.* is het systeemmodel doelmatig als het 'adekwaat' verklarend of voorspellend is. De term adekwaat kan doelen op de verminderende meeropbrengst ten aanzien van wetenschappelijk inzicht, of ten aanzien van een planvorming, ontwerp- of beheers doeleinde.

In de *klasse b.* is het systeemmodel doelmatig als het voorschrijft wat gedaan dient te worden indien alle aannamen van het model aanvaard worden door de voornaamste belanghebbenden. Om dit te bereiken worden methoden gevolgd die een systematische analyse van keuzeproblemen bevorderen en waarbij elke stap van de analyse zo expliciet mogelijk wordt gemaakt. Als modelinvoer vindt men vaak de resultaten van klasse a. modellen.

9. Beschrijvende en Voórschrijvende modellen

Modellen waarvoor de gestelde vraag tot bovengenoemde klasse a. behoort kunnen beschrijvende modellen worden genoemd. Moderne simulatie modellen behoren bijv. tot deze groep. Zoals reeds gesteld kan hun bouw nog voornamelijk wetenschappelijk gemotiveerd zijn. Onderzoek op dit gebied met gebruik van parameter optimalisatie methoden wordt wel identificatie-analyse genoemd.

Modellen in klasse b. vertegenwoordigen een binding met menselijke belangen en daarom met relatieve waarden, conflict, afweging en besluitvorming. Wegens hun betrekken van waardeoordelen en hun rol in besluitvorming kunnen zij normatieve of ook wel voórschrijvende modellen worden genoemd. Hiermee raakt men uiteraard buiten het traditioneel wetenschappelijke. Het is daarom nuttig om de groei en rol van systeemanalyse* even aan te stippen vanuit een sociaal perspectief.

* Aansluitend bij spraakgebruik wordt de term 'systeemanalyse' gemakshalve gebezigd om geïntegreerd gebruik van systeembegrippen, -benadering, en -analyse aan te geven. Wanneer studies op één van de drie gebieden betrokken zijn, is kwalificatie van de term geboden.

Sociaal perspectief

1. Verband met Sociale Ontwikkeling

De plotselinge, soms hevige belangstelling voor systeemanalyse wordt door sommige voorstanders gezien als een welkome groei van rationalisme. Overmatig enthousiasme van voorstanders zowel als onredelijk scepticisme van tegenstanders duiden inderdaad op filosofisch-culturele vooronderstellingen in de beschouwing van systeemanalyse. Het gretig (Westerse) gehoor voor de resultaten van sommige systeemanalyses (zoals die verricht voor de Club van Rome), is evenwel meer te wijten aan hun samenvallen met zich ontwikkelende cultureel-sociale ideeën dan aan begrip voor of geloof in de rationaliteit waarmee die resultaten zouden zijn verkregen. Onder de proponenten van systeem-analyse vindt men trouwens velen die juist daarmee paal en perk willen stellen aan de vlucht van het rationalisme zoals dit met andere vruchten van de renaissance (individualisme, liberalisme, expansie drift, enz.) is uitgemond in de dominantie van natuurwetenschap, -techniek, en liberale economie. Het schijnt daarom onjuist systeemanalyse gebonden te zien aan een bepaalde visie. Het is veeleer een poging om met nieuwe middelen de efficiëntie van denken en van beheer te vergroten; zij wordt ondernomen vanuit velerlei visie. De mogelijkheid hiertoe en de noodzaak hiervan zijn echter wel ingebakken in de nog voortgaande ontwikkeling van wetenschap en techniek.

2. Wetenschap en Techniek

Wetenschap en Techniek hebben in een eeuw tijds een enorme beheersing van eens onbeheersbare natuurlijke afhankelijkheden en beperkingen gebracht. Eerst na 1960 ontstond een meer algemene herkenning van de daarin besloten exponentiële groei (bevolking, grondstoffenverbruik, milieu degradatie, enz.) en van de limieten daarvan in een eindige wereld met slechts één invoer (zonlicht). Een even snel groeiende informatiedichtheid heeft geleid tot een wereldbeeld dat vanuit fysisch en psychisch oogpunt een gesloten systeem aan het worden is. Hierin hebben wetenschap en techniek verscheidene 'explosies' (equivalent voor 'exponentiële groei') op gang gebracht. De vraag hoe deze het 'best' zijn te bedwingen poneert een regulatieprobleem van ongekende omvang.

3. Regulatie

Voor een gesloten systeem is regulatie beperkt tot die van subsystemen en hun relaties. Ten aanzien van een systeemvraag (bijv. het op de 'beste wijze stoppen van groei') worden in principe regionale en lokale kwesties allen het onderwerp van

open systeembeschouwingen van het doelmatige type. Zij worden herkend als deelproblemen die fysisch en/of beheersgewijze verbonden zijn aan andere, vaak andersoortige deelproblemen in hun 'omgeving'.

Wanneer nu de gestelde vraag een systeem modelmatig gevoelig maakt voor een groot aantal 'koppelingsvariabelen' die het binden met andere subsystemen, wanneer die variabelen multidimensionaal zijn, wanneer veel terugkoppeling aanwezig is, en wanneer men rationale regulatie wenst met zijn vraag naar kwantificatie, dan is de relevante probleem situatie onmiddellijk groot en complex, en dus 'systeemachtig'. De regulatie van bevolkingstoename, van grondstoffenverbruik, van bewapeningswedlopen, enz. worden nu in wijde kring erkend als systeemproblemen. Op meer regionale schaal spreekt men bijv. van verkeers-, water-, communicatie- en onderwijssystemen. Dit zijn alle publieke sector problemen van grote persistentie.

4. De Organisatie van Informatie en Besluiten

Het besef groeit dat voor de oplossing van systeemproblemen, simpele remedies, of goede wil, of politieke moed alléén onvoldoende zijn.

De realisatie groeit, dat naast verzwegen informatie er ook vele beslissingen worden genomen op grond van intuïtie waarbij 'zachte' informatie beschouwd wordt als 'goed genoeg' in de 'beschikbare tijd'. Als gevolg is er toenemende bereidheid te luisteren naar de thesis dat in sociale beslisprocessen 'n verhoogde rationaliteit en kwaliteit van besluiten nodig en mogelijk zijn. Er is gehoor voor de stelling dat het zowel gewenst als mogelijk is om problemen methodisch in breder verband en op langere termijn te beschouwen en dat dit neerkomt op een meer formele, doelgerichte, en inter-disciplinaire organisatie van informatie.

Beginselen voor die methodische organisatie bijkomende procedurele en analytische methoden, en gebouwde wiskundige modellen worden nu allerwege aangedragen onder de verzameltermen 'systeembenadering' en 'systeemanalyse'. Als grondslag vindt men het begrip 'systeem' hetgeen synoniem wordt genomen met 'denkmodel' van het 'component-relatie-doelstellingen' type.

5. Systeembenadering en -analyse

Methodische benadering en wiskundig modelleren zijn uiteraard niet nieuw. Nieuw is de mogelijkheid dit te doen voor problemen die groot en/of complex zijn. Deze mogelijkheid is gegroeid met de ontwikkeling van rekenmachines en heeft,

op haar beurt, die ontwikkeling gestimuleerd.

De term 'rekenmachine' dient in dit verband opgevat te worden als modellenlaboratorium. Dit verduidelijkt dat het niet altijd gaat om rekenkundig grote problemen. Ook verricht laboratorium werk waaruit nuttige systeembenaderingen zijn gedistilleerd, vertegenwoordigt 'nieuw' gereedschap voor denkbaarheid. De interactie tussen de ontwikkeling van de rekenmachine, het uitwerken van bekende en nieuwe wiskundige analysemethoden, en hun beider toepassing op situaties waarvoor niet alléén de fysische werkelijkheid maar ook menselijk gedrag beschreven werden, was aanwijsbaar vanaf het begin (tijdens de tweede wereldoorlog). In de vijftiger jaren leidde militaire 'operations research' (via toepassingen in de bedrijfskundige techniek) tot een omwenteling in de wijze waarop in het grootzakenleven beslissingen worden voorbereid. Intuitive ordening van informatie heeft daar het veld geruimd voor een formeel ordenen van informatie, zoals de analyse en adoptie van gekwantificeerde doelstellingen en hun optimale implementatie. Ook meer technische besturingsproblemen in industrie, landbouw, ruimtevaart, enz., droegen bij tot toenemende sociale waardering voor en afhankelijkheid van numerieke informatieverwerking.

6. Publieke Sector Problemen

Pogingen om rekenmachines (nog steeds in de zin van modellaboratorium) verder uit te buiten en o.m. systeemanalytische methoden toe te passen op problemen uit de publieke sector bleven niet uit. Die problemen bleken evenwel veel moeilijker en minder toegankelijk dan militaire-, zaken-, of ruimtevaart vraagstukken. Na veel vallen en opstaan kan nu toch worden gesproken van een nuttig gebruik van systeembenadering en -analyse voor problemen in de publieke sector. Vanuit de sociale wetenschappen bezien zou men systeemanalyse een 'vriendelijke invasie' van natuurwetenschappelijk modelleren kunnen noemen. Omgekeerd vinden inductieve modellen meer ingang in technische kring. De ongemene efficiëntie van wiskundig modelleren en moderne informatieverwerking en ook de grote communicatiebehoefte allerwege, versterken die wederzijdse penetratie.

7. Sociaal Nut

a. Aard van Bijdrage - Het is een misvatting om het nut van systeemanalytisch werk voor te stellen als het 'optimaal oplossen' van bijv. sociaal-technische problemen. Sociaal gezien verschaft systeemanalyse in hoofdzaak beter georganiseerde informatie

aan besluitnemers. 'Besluitnemer' is een aanduiding voor de dynamische, deels verborgen coalitie van belanghebbenden, specialisten, politici, ambtenaren, enz. Tot de informatieproducten van systeem-analyse behoren: verwevenheidsinzicht; voorspelling van de gevolgen van eventuele besluiten; rationale plannen of opties; kwantitatieve afwegingen van planwijzigingen ('trade-offs'). Vooral het laatste vertegenwoordigt een superieure organisatie van informatie.

b. Rol - Voor sociaal-technische vraagstukken (bijv. milieubeheer) is besluitvorming een complex proces. Het heeft o.m. invoeren en beperkingen van gevoelsmatige, politieke, legale en institutionele aard. Systeemanalytisch werk produceert maar één van de invoeren tot dit proces. Meer rationale plannen en superieur georganiseerde informatie kunnen tot betere beslissingen leiden maar dat hoeft niet. Men kan alleen stellen dat gegeven dezelfde situatie, dezelfde plannenmakers, en dezelfde beslissers, de afwezigheid van systeemanalytische invoer de kans op het 'beste' besluit verkleint.

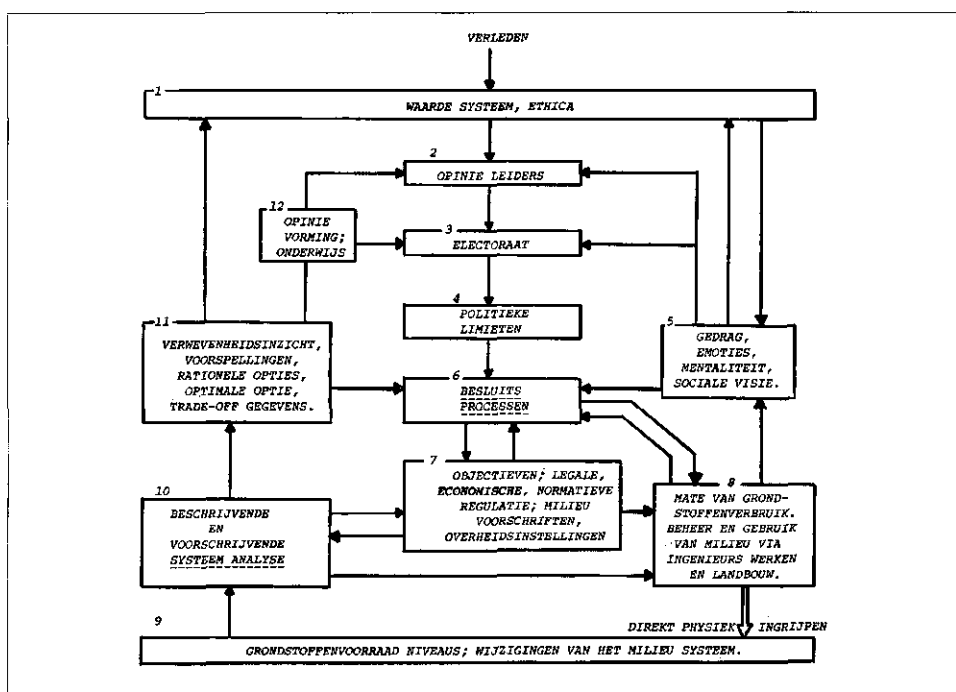
c. Aanwijsbaarheid - Het sociale nut van systeemanalyse in fysische productie verhoging (betere efficiëntie, grotere betrouwbaarheid, enz.) is het duidelijkst aantoonbaar waar enkelhoofdig besluiten en enkelvoudige doelstellingen de situatie redelijk beschrijven. Dit wordt het meest benaderd in militaire organisaties, in het zakenleven en in de exploitatie van bestaande werken. Dan nog is goed

inzicht in de waardevolle rol van systeem-analyse beperkt tot enige specialisten. Bij ontwerp en beheer van systemen in de publieke sector is veelvoudigheid van besluitnemers en doelstellingen regel. Besluiters zijn uiteraard in staat en geneigd de waardering voor inzichten verkregen met systeemanalyse zichzelf toe te rekenen. In conclusie: systeemanalyse roept grote verwachtingen op; het heeft een redelijk sociaal nut; de aanwijsbaarheid van dit nut is klein.

8. Relatie-diagram

Systeemanalyse verduidelijkt de verwevenheid van problemen. Alhoewel 'alles met alles samenhangt' is het slechts nuttig om, na keuze van een doelstelling, de belangrijkste afhankelijkheden op te sporen en te doordenken. Dit kan informeel gebeuren met een relatiediagram. Afb. 1 geeft hiervan een voorbeeld. Het is ontworpen om de (overigens geidealiseerde) rol van systeemanalyse, in het bijzonder voor milieubeheersanalyse, aan te geven. Relatiediagrammen, gegroeid uit de black box aanpak, zijn typische exponenten van systeembenadering. In alle eenvoud en subjectiviteit complementeren zij het uitsluitend verbaal modelleren. Ter illustratie, stel dat in verband met eerder genoemde exponentiële groei een groep wordt gevraagd zeven mondiale deelproblemen, n.l.: onderwijs, nationalisme, politiek, bevolkingstoename, grondstoffen, milieu en voedsel te rangschikken naar belangrijkheid. De groep begint, komt tot debat,

Afb. 1 - Een relatiediagram dat de sociale rol van systeemanalyse aangeeft met enige nadruk op milieubeheer.



verschillende volgorden, en ook de conclusie dat die toch niet helemaal willen kloppen. Inderdaad, voor alle rangschikkingen, óók de bovenstaande, kan men het 7de probleem afhankelijk zien van het 6de, het 6de van het 5e, tot en met het 2de van het 1ste. Maar dan is ook het 1ste causaal afhankelijk van het 7de (honger maakt onderwijs minder effectief, bijv.). Een zo te sluiten kringloop duidt op een typische karakteristiek van een systeem probleem: men weet niet waar te beginnen.

Tussen de 7 genoemde deelproblemen is het mogelijk 42 causale relaties te vinden. In uitsluitend verbaal modelleren, zoals in debat, kunnen bijv. de vier meest genoemde en luidst voorgedragen relaties gemakkelijk de andere 38 elimineren zonder écht kritische selectie. Met behulp van een relatiediagram kunnen relaties beter worden overzien, kan het selecteren wat meer objectief gebeuren, en kunnen terugkoppelingen veel eenvoudiger worden gezien. Tenslotte kan het geheel beter gebonden blijven aan de 'gestelde vraag' (afgeleide doelstelling of bedoeling) zoals dit in de benaming van het diagram is te vinden.

Ingenieursperspectief

1. Aard van het Ingenieurswerk

Natuurwetenschap beschrijft de natuur. Het doel is om dit elegant, efficiënt, en ge-coördineerd te doen. Dit doel is intern. Waarde-oordelen zijn daarbij niet relevant; die zijn traditioneel een persoonlijke zaak. De structuur der wetenschap is voornamelijk axiomatisch. Causale relaties staan centraal.

Ingenieurswerk is ook, alhoewel ten dele, beschrijvend. De doelstelling is evenwel extern: ingenieurswerk dient op veel directer wijze sociale, productieve, en milieubeheersdoeleinden. Als het meest karakteristiek wordt wel het ontwerpproces gezien; dat is een combinatie van specialistische kennis, creativiteit, afweging en compromis.

Het laatste duidt op binding met relatieve waarden, limieten, en optimalisatie. Het gezegde: 'ingenieurswerk is het vinden van het beste ontwerp voor het minste geld' is een karikatuur en tegenstrijdigheid. De techniker, tenslotte, dient (vaak ingewikkelde en zeer verantwoordelijke) technische taken zonder wijziging in voorgescreven procedures efficiënt uit te voeren. Zijn taak wordt aangenomen te zijn geoptimaliseerd.

2. Nieuwe Middelen

De neiging bestaat om een ingenieursperspectief op systeemanalyse te schetsen als

de aanpassing tot nieuwe middelen, en wel in het bijzonder:

- 'Computers' die behalve de functies van super-rekenaar, meer en meer die van tekenaar, administrateur, bestuurder, en modellaboratorium aannemen.
- 'Operations Research', bijv. lineair en dynamische programmeren, stochastische optimalisatie, beslissingstheorie, enz.
- Interdisciplinair groepswerk.

Het met behulp van deze middelen kunnen analyseren van aanmerkelijk meer gecompliceerde modellen van praktijkproblemen is inderdaad een essentieel nieuw element. Gezien tegenstand, vooral vanuit een kosten-oogpunt, is het evenwel niet vanzelfsprekend of en op welke manier de ingenieurs-professie volledig benutting van dit potentieel zal en kan nastreven. Een nieuwe professionele zienswijze en een nieuwe aanpak zijn daarvoor nodig. Deze zijn, met de nieuwe middelen, medebepalend voor het ingenieursperspectief op systemen.

3. Systeemanalyse in Engere Zin

Gezien de zo sterke tendens om zich op bovenstaande middelen als zodanig te concentreren, zij opgemerkt dat zij middelen zijn om een nieuwe professionele visie en aanpak te realiseren. Concentratie op deze middelen is voornamelijk werk voor specialisten.

De concentratie op het gebruik van statistiek, operationele methoden, en simulatie modellen voor bijvoorbeeld water- of verkeerssystemen kan men systeemanalyse in engere zin noemen.

In deze ingenieursgebieden heeft dit zich reeds bewezen als een zéér waardevol complement van traditionele plan-, ontwerp- en beheersmethoden.

4. Nieuwe Professionele Zienswijze

Het ingenieursperspectief op de ontwikkeling van systeemanalyse, i.h.b. voor publieke sector problemen, is dat het méér is dan een aanpassen aan onder 2 genoemde nieuwe middelen. Het omvat een 'herontdekken' dat ingenieurswerk twee aspecten heeft, nl. een beschrijvend (wetenschappelijk, voorspellend model) aspect en een vóórschrijvend (sociaal, normatief model) aspect. De essentie van het ingenieursperspectief op systeemanalyse is dat met genoemde middelen een fusie van deze twee aspecten meer formeel en operationeel gemaakt kan worden. Voorts dat hierbij de adoptie en eigen aanpassing van algemene systeembegrippen veel hulp kan bieden.

Een nieuwe zienswijze op de aard van ingenieursontwerp en beheer voor systeem-

problemen (dus *niet* voor alle ontwerpaktiviteit) is vereist voor deze fusie. Zij behelst een:

- inzien dat waarde-oordelen en belangenafweging impliciet zijn in elk technisch ontwerp of beheersplan;
- centraal stellen en afwegen van fundamentele doelstellingen (zoals economische efficiëntie, sociale distributie van projectgevolgen, milieubehoud) in ontwerp en beheer;
- inzien dat technische systeemstudies informatie leveren voor doelstellingsafweging in de beleids sfeer, zodat het maken van een a priori optimaal ontwerp niet nagestreefd dient te worden;
- produceren van voldoende technische ontwerp- en beheersplan varianten teneinde in de beleids sfeer werkelijk keus te verschaffen;
- aanvaarden dat intuïtie en technische ervaring alléén vaak onvoldoende zijn om de 'best mogelijke' of 'optimale' oplossing te vinden;
- begrip voor de veelsoortige en langdurige effecten van ingenieurswerken.

5. Nieuwe Aanpak

De uitspraak 'systems engineering is engineering, only more so' geeft aan dat vele systeemoplossingen zijn gemaakt maar nooit zo genoemd zijn. Ook dat, naast puur technisch kunen, er altijd wel aandacht is voor het groter verband en voor optimaliteit. Die aandacht is evenwel informeel, intuïtief, en vaak incompleet. De genoemde nieuwe zienswijze verwijst naar grotere formaliteit en compleetheid. Ten einde deze te verkrijgen is een nieuwe aanpak nodig. In de wandel wordt zij met 'systeembenadering' aangeduid.

Hoewel dit vaak wordt geprobeerd, laat de systeembenadering zich, evenals het ingenieurswerk zelf, moeilijk definiëren als een serie van te volgen stappen. Het noemen van enkele kenmerken, en enkele procedurele en organisatorische aspecten van deze nieuwe aanpak is meer reëel.

6. Kenmerken

Kenmerkend voor een systeembenadering en -analyse zijn:

- Interdisciplinaire oriëntatie* - disciplines zijn efficiënt in het verschaffen van 'aspect beschouwingen'. De werkelijkheid levert in eerste instantie problemen, géén aspect problemen (tenzij men meteen hele verbanden wegdenkt). Aspectintegratie is daarom nodig.
- Systeem oriëntatie* - de werkelijkheid wordt gemodelleerd als een groep van open subsystemen (black boxes) waarvan in-

en uitvoeren wezenlijke invloed hebben op de doelstelling. De aard van het probleem en de relatiestructuur krijgen veel aandacht; subsysteem details, zelfs wanneer berekenbaar, worden onderdrukt.

c. *Parametrisch ontwerpen* - de formulering van ontwerpen en van beheersvoorschriften waarbij de effectiviteitsparameter waarin de (afweging van) doelstelling(en) is uitgedrukt, systematisch wordt gewijzigd teneinde wezenlijk verschillende varianten te verkrijgen.

d. *Wiskundig modelleren* - het gebruik van simulatie, optimalisatie, correlatie en andere wiskundige modellen en de vermindering van verbaal gestelde verbanden of keuzen.

De correlaties tussen deze kenmerken en genoemde zienswijzen zijn:

kenmerken	zienswijzen
gesteld in:	gesteld in:
6-a	4-a, f
6-b	4-b
6-c	4-c, d
6-d	4-e

7. Procedures

In dit definiërend artikel over systeemanalyse voor ingenieurs kan het grote aantal methoden, procedures, en hun combinaties gangbaar in systeembenadering en systeem-analytisch werk in engere zin niet opgesomd, laat staan besproken worden.

Eén manier om ze althans te classificeren is hun verdeling over drie procedurele hoofdfasen:

a. *Synthese en Modelleren*: deze fase omvat o.m. de iteratie tussen probleem exploratie; verzamelen van gegevens en beperkingen; het nauwkeurig stellen van het probleem en van de 'gestelde vraag' of (afgeleide) doelstelling; synthese van ideeën tot enkele typen oplossingen; haalbaarheidsanalyse vanuit verscheidene gezichtspunten; en het zeer uitgebreide gebied van simulatie met grote rekenmachines.

b. *Analyse en optimalisatie*: deze fase omvat o.m. het kwantificeren van de probleem- en vraagstellingen; vertaling van de werkelijkheid in de termen van een optimalisatiemodel en de adoptie van effectiviteitsparameters waarin de graad van benadering van de doelstelling wordt uitgedrukt; de generatie van variantoplossingen; de optimalisatie van varianten; en de gevoeligheidsanalyses van zulke oplossingen.

c. *Waardeschatting en interactie*: deze fase omvat o.m. het op gelijke noemer brengen en aggregeren van systeeminvoer en -uitvoeren, zowel naar soort als in de tijd; speciale communicatie- en presentatie

methoden om de keuze van (parametrische gegeven) optimale oplossingen door 'beslissers' te bevorderen.

In de praktijk vindt voortdurende iteratie plaats tussen genoemde fasen. Er is géén vaste volgorde van procedures die kan worden gevolgd.

8. Organisatie

Het wordt wel aangenomen dat systeem-analyse het best gedijt op grotere bureaus en in overheidsinstanties aan wie eigenlijke beheerstaken zijn opgedragen. Voor een deel is dit een verwijzing naar de moeilijkheden van a. interdisciplinair teamwerk en b. de hoge kosten van systeemanalyse.

a. *Interdisciplinair werk*. Dit blijft moeilijk te organiseren. Iemand uit een gewenste discipline behoeft geen wezenlijke interesse te hebben in een bepaald probleem.

Ook leidt een gegeven probleem meestal tot een ongelijke omvang van disciplineaire taken. Voorts is er de communicatie barrière doordat de disciplineaire modelaannamen zo impliciet zijn in het denken van hun gebruikers. Tenslotte is er voor samenwerkers de kwestie van institutionele binding en interne beloningsstructuur die zijn afgestemd op het eerste doel van de doorsnee bureaucratie, nl. zelfbehoud. Het alternatief van multi-disciplinair werk wordt wel voorgestaan om bovenstaande moeilijkheden te mijden. Elke discipline werkt daarbij eerst alleen; de resultaten tracht men dan later bijeen te voegen.

De problemen blijven; de resultaten zijn niet merkbaar beter. Een alternatief zou zijn te werken rondom een veelzijdig individu. Een echte meta-wetenschapper is vandaag een genie en dus te schaars.

Een vermoedelijk zeer effectieve aanpak is om de doorsnee ingenieur inzicht te verschaffen in de belangrijkste variabelen die een ingenieurssysteem metterdaad koppelen aan andere systemen. Men zou dit raakvlakontwikkeling kunnen noemen. Voor ingenieurs is een belangrijk raakvlak dat met de economische wetenschap.

b. *Hogere kosten*. Als regel zijn hogere kosten verbonden aan de systeem-analytische aanpak, zeker waar interdisciplinair werk wordt gedaan. Voor ingenieurswerk met betrekking tot problemen in de publieke sector zullen die kosten bestreden moeten worden van overheidswege. Immers, de verhoogde kwaliteit van projecten is vaak ontmoetbaar in geld en heeft het karakter van een publiek goed. Voorts is de educatie van professionelen ten einde kwaliteitsverhoging van projecten te verkrijgen typisch wél in het publiek belang maar nauwelijks afzonderlijk verhaalbaar.

9. Raakvlakontwikkeling

Disciplines zijn efficiënte systeemmodellen van de werkelijkheid. Het aantal koppelvingsvariabelen met andere aspectmodellen is geminimaliseerd; de meest noodzakelijke worden vaak geabsorbeerd. In het extreme geval is een discipline een gesloten systeemmodel van de werkelijkheid. Interdisciplinair werk is een natuurlijk gevolg van de open systeembeschouwing. De hiermee verbonden moeilijkheden kunnen verlicht worden door de creatie van nieuwe specialisaties die 'mengvormen' zijn van gevestigde disciplines. (Het civiel ingenieursvak is hiervan een geslaagd voorbeeld). Een alternatief dat de efficiëntie en het penetratievermogen van gevestigde disciplines handhaaft, is 'raakvlakontwikkeling'. Hiermee wordt bedoeld dat een discipline A zich vertrouwd maakt met de meest essentiële koppelvingsvariabelen die het binden met discipline B. Voorts dat A-beoefenaars iets begrijpen van de standaardmodellen van discipline B, en vice versa. Dit bevordert:

- effectieve interdisciplinaire samenwerking waar nodig;
- het kiezen van wat relevant is in een gegeven situatie.

10. Techniek en Economie

Ingenieurs die werken aan systeemproblemen in de publieke sector hebben 'raakvlak-kennis' nodig van de sociale- en menswetenschappen. Onder deze is de economie het dichtstbijstaand. Het ingenieursvak en de economische wetenschap vertonen enkele fundamentele overeenkomsten zoals:

- een vóórschrijven van wat het 'beste' is (gegeven een consensus aangaande een pakket van modelaannamen);
 - een interesse in optimalisatie technieken;
 - een kwantitatieve, wiskundige benadering;
 - een bemoeienis met tijd, risico, en beslissen.
- Bovendien is van een ingenieursoogpunt de economie complementair in de zin dat:
- de economie een sociale wetenschap is;
 - in de economie het probleem van relatieve waarden is bestudeerd; dit levert koppelvingsvariabelen tussen ingenieursontwerp of operationeel beheer en hun externe doeleinden;
 - de economie zich heeft toegelegd op inductief modelleren, terwijl het ingenieurswerk stoelt op deductief of causaal modelleren; beide zijn nodig in systeemanalyse.

Als voorbeeld van de verschillen:

- een ingenieursfout leidt tot een proces;

een economische voorspelling wordt wel opgevat als een weersverwachting.

Een minimum aan raakvlakbegrippen nodig voor effectief systeemanalytisch werk zou het volgende omvatten: productie functie; economische efficiëntie; marginale prijzen; utiliteit; welvaartseconomie en het Pareto-acceptabele zijn van technische oplossingen; schaarste, vraag en aanbod evenwicht; publieke goederen; externaliteit; commercieel en sociaal disconto; en schaduwprizen.

Een milieu perspectief

1. Watersysteem

Als milieuperspectief en als toelichting van genoemde begrippen, kunnen enige opmerkingen over het 'watersysteem' nuttig zijn. Nog vrij recent konden bijv. industrieën, S_k , die rivierwater gebruikten en het vervuild loosden, als gesloten systemen worden beschouwd ten aanzien van watergebruiks- of waterkwaliteitsvragen.

Zij vormden in die opzichten een verzameling, niet een systeem. Symbolisch:

$$S_k, S_j; k = 1, 2, \dots, 1, \dots, K \quad (1)$$

Indien men slechts uit interesse of uit census-overwegingen de vraag stelt: wat is de door alle S_k onttrokken hoeveelheid water $\bar{X} = \sum [x(r, s, t)]$ en de geloosde hoeveelheden vuil $\bar{Y} = \sum [y(r, s, t)]$, dan heeft men een 'optelbaar' systeem (zie tabel I). De elementen S_k blijven in wezen gesloten systemen doch de verzameling is nu een open systeem. Symbolisch:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_k, S_l \\ \text{G.V.} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \bar{X} \leftarrow \\ \rightarrow \bar{Y} \end{array}; r, s = \text{coördinaten,} \\ t = \text{time} \quad (2)$$

waarin G.V. = gestelde vraag. Hoewel de S_k op zichzelf ingewikkelde systemen kunnen zijn, zijn ze hier als korrels van een hoop zand; hun enige relatie is de G.V.: 'hoe groot is de hoop?'

Indien er voor een toenemend aantal S_k gebruiks- en lozingslimieten worden bereikt, zeg $\bar{x}L$ en $\bar{y}L$, zodat ook de \bar{X} en \bar{Y} limieten benaderen ofwel schaars worden, dan kan de G.V. zich tot een systeemvraag wijzigen, bijv.: 'wie krijgt wat'; 'hoe verdeelt zich die schaarste?'. Symbolisch: wat zijn \bar{x} en \bar{y} in:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{x} \leftarrow \\ S_k (\quad) S_l \\ \rightarrow \bar{y} \end{array} \right\} \text{G.V.} \rightarrow \bar{Y} \quad (3a)$$

wanneer:
 $\bar{X} = \bar{x}L$; $\bar{Y} = \bar{y}L$; $\bar{x} = \bar{x}(r, s, t, y)$?
Vgl. 3a kan verkort worden tot:

$$\left\{ S \right\} \text{G.V.} \rightarrow \bar{Y} \quad (3b)$$

2. Beschrijvende Modellen

De G.V. 'wie krijgt wat' kan nog steeds een vraag naar technisch-wetenschappelijke of sociaal-wetenschappelijke informatie zijn. De Vgl. 3 stelt dan een beschrijvend model voor. Beschrijvende modellen verschaffen de responsies ten gevolge van veranderingen in de koppelvrijvariabelen \bar{x} , \bar{y} , X en \bar{Y} , of in de limieten $\bar{x}L$ en $\bar{y}L$, of in de componenten S_k .

De efficiëntie van disciplines leidt tot het bouwen van disciplinaire 'beschrijvende modellen'. Interdisciplinaire beschrijvende modellen zijn voor te stellen als:

$$\left\{ \begin{array}{l} S \\ \text{SG} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \bar{X} \leftarrow \\ \rightarrow \bar{Y} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} S_0 \\ \text{G.V.} \end{array} \right\} \quad (4)$$

waarin: S = hoofdsysteem vanuit het oogpunt van een der medewerkende disciplines; SG = daarbij passende systeemgrens; S_0 = systemen in S -omgeving waarmee S wezenlijke relaties heeft. In alle gevallen zijn de vaak moeilijke keuzen voor de S_k , \bar{x} , \bar{y} , SG , \bar{X} , \bar{Y} , en S_0 , een functie van de G.V. Het realistisch en specifiek maken van de gestelde vraag G.V. is bijzonder belangrijk. Voor milieu ingenieurs kan S bijv. een stelsel van waterwinning en/of waterzuiveringsinstallatie zijn; SG een stroomgebied; S_0 het fysisch systeem buiten SG en bijv. het economisch systeem waarin de X en \bar{Y} gecommensureerd of vergelijkbaar gemaakt kunnen worden. Beschrijvende modellen, vooral simulatie modellen kunnen heel uitgebreid zijn. De verfijninggrens is meestal bepaald door beperkingen in beschikbare data. Als men de data voor calibrering heeft, zijn nu goede modellen beschikbaar voor zuurstof verloop, temperatuur, verzilting, grondwater, dynamische beweging in riool- en riviernetten, enz.

3. Voórschrijvende of Beheersmodellen

Voórschrijvende of beheersmodellen kunnen, analoog met de Vgl. 4 gebruikte vorm, worden voorgesteld door:

$$[f(\bar{X}, \bar{Y}) = 0]_{N.V.} \quad (5)$$

waarin: f = produktiefunctie (hetgeen in ons verband een verzameling van fysische modellen ondergebracht in 'efficiënte ingenieurs ontwerpen' voorstelt) en $N.V.$ = normatieve vraag. In optimalisatie modellen heeft de $N.V.$ vaak de vorm:

$$\text{MAX} [U(\bar{X}, \bar{Y}, p_x, p_y)], \text{ wanneer:}$$

$$f = 0 \text{ en } G_m(\bar{X}, \bar{Y}) \geq B_m \quad (6)$$

waarin: U = systeem effectiviteitsparameter of doelstellingsfunctie, bijv. baten minus kosten; p = commensuratie gewichten; G_m = beperkingen * op de optimaal te kiezen \bar{X} en \bar{Y} . Beheersmodellen worden gebruikt

om informatie te verkrijgen ter beantwoording van de vraag hoe men het 'beste' een tot kwestie geworden vraag, bijv. 'hoe \bar{x} en \bar{y} schaarste te verdelen' kan aanpakken. Vaak wordt $\text{MAX}[U]$ gereduceerd tot $\text{MIN}[C]$, waarin C = kosten van een plan Dit is een afgeleide van de 'Vergroting van het Nationaal Inkomen' doelstelling. Andere doelstellingen zoals milieubehoud, werkgelegenheid, enz. worden dan ingevoerd

onder de beperkingen $G_m \geq B_m$.

Milieuvoorschriften hebben bijv. deze vorm. Beheersmodellen dienen eenvoudiger te zijn dan beschrijvende modellen. Daarom is complementair gebruik raadzaam waarbij het beheersmodel belovende varianten isoleert die met beschrijvende modellen nader worden onderzocht.

Voor de ingenieur is het werk met beheersmodellen moeilijker dan dat met beschrijvende modellen. Men ziet vaak een vlucht in de ermee verbonden optimalisatiewiskunde. Aan de laatste zal hier worden voorbijgegaan om enige slotopmerkingen te wijden aan de onderliggende vraag waarom waterbeheer tot systeembeheersvragen leidt.

4. Systeembeheer

Systeembeheer is het gevolg van een systeemvraag, die, op haar beurt, veroorzaakt wordt door beperkingen die een verzameling eenheden treffen. In bijv. het waterkwaliteitssysteem heeft het ontstaan van beperkingen twee verstrengelde oorzaken. Ten eerste vermeerderd in absolute zin het residu dat wordt aangeboden voor transport en natuurlijke assimilatie.

Ten tweede leidt verzadiging met produktie goederen tot een relatieve waardevermindering van milieugoederen ('nieuwe' schaarste). Helaas biedt in dit geval het marktsysteem te weinig hulp in het zich aanpassen aan naderende limieten. Het kan de herdistributie van schaarste naar minder waardevolle gebruiken niet behoorlijk bewerkstelligen om twee fundamentele redenen:

- de publiek voorzienings karakter van 'waterdiensten'. De extra of marginale kosten om een kwaliteitsverbetering van water in bijv. stadsgrachten beschikbaar te maken voor één extra persoon, is nul. Daar dat begrepen wordt komt er van gebruikszijde geen reële aanbodsprjs voor waterkwaliteit. Als gevolg kunnen bedrijven deze dienst niet leveren in een vraag-aanbod verband.
- de creatie van externe effecten die inherent zijn aan de structuur van het watersysteem. Het ongezuiverd lozen van

* Ongelijkheidsbeperking, zo typisch voor ontwerpsituaties, leidt tot wiskunde die nogal verschilt van de van de natuurkunde georven differentiaal en integraal rekening.

de bovenstroomse vervuiler veroorzaakt schaden aan benedenstroomse gebruikers. Als die schade niet verhaald kan worden, houdt de lozer de door hem veroorzaakte schadekosten extern van zijn besluitvorming. Dit leidt tot zijn overgebruik van water in die zin dat zijn baten kleiner zijn dan de aan derden berokkende kosten.

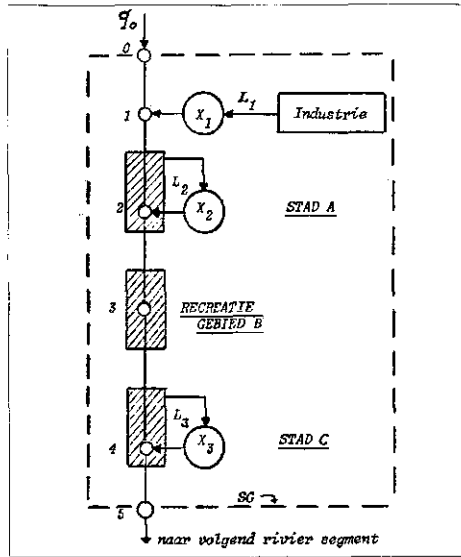
Bij gebrek aan een redelijk werkend gedecentraliseerd marktmechanisme dient schaarsteverdeling te geschieden middels systeembeheer dat, zo het niet wordt gecentraliseerd, tenminste centrale doelstellingen heeft. Alleen zo is er kans de afweging van (verborg) vraag en (alleen centraal efficiënt te verzorgen) aanbod, alsmede de afweging van baten en kosten waar deze ook voorkomen in het systeem, zodanig te doen zijn dat het netto sociaal nut van de hulpbron water zo groot mogelijk wordt. De term 'netto' wijst erop dat de niet geringe kosten van systeembeheer en centralisatie in rekening moeten worden gebracht. Het systeembeheer kan door een speciale organisatie van belanghebbenden of direct door de overheid geschieden. Het laatste is gewenst als het grote publiek op directe wijze belanghebbend is.

5. *Systeemanalyse*

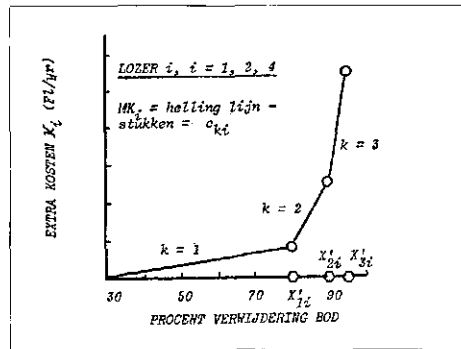
Een typerende trek van systeemproblemen, nl. het niet-evident zijn waar te beginnen met de oplossing, is ook hier te illustreren. Waterbeheer hangt af van gekozen doelstellingen. De keus van doelstellingen, bijv. het kiezen en handhaven van kwantitatieve milieu voorschriften, hangt af van de kosten. De kosten hangen af van de wijze waarop technische, economische en legale maatregelen worden ontworpen en uitgevoerd. Dat dit ontwerp tenslotte weer afhangt van de doelstellingen sluit een kringloop. Een bruikbare aanpak is het probleem te splitsen in twee systeemproblemen die elkaar beïnvloeden via een klein aantal koppelvingsvariabelen. De problemen zijn:

- a. welke waterkwantiteit en -kwaliteit wordt verlangd? (afwegingsvraagstuk);
- b. hoe worden gewenste kwantiteit en kwaliteit het best bereikt, verdeeld, en gehandhaafd? (technisch-socio-economisch vraagstuk).

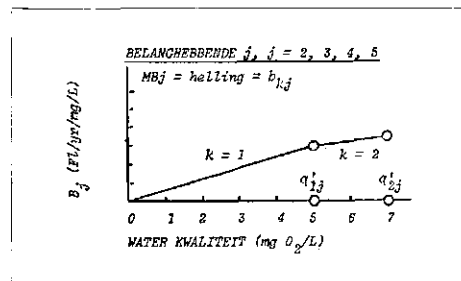
Het is niet doenlijk om in elke volgende situatie dit complexe probleem weer helemaal van voren aan te pakken. Een rationeel raamwerk van het verkrijgen voor het besluitproces werkelijk relevante afwegingsinformatie, is gewenst. Systeemanalyse toegepast op watersysteem vraagstukken pretendeert zulk een raamwerk te zijn.



Afb. 2.



Afb. 3.



Afb. 4.

6. *Relatiediagram*

Het relatiediagram in afb. 1 tracht te verduidelijken dat systeemanalyse meer produceert dan alleen informatie voor het besluitproces (10 → 11 → 6). Het kan ook helpzaam zijn in de kwantitatieve formulering en adoptie van doelstellingen, en van legale, economische en administratieve voorschriften (10 → 7 → 10; 6 → 7 → 6). Hierin gaat het grotendeels om de bovenstaande vraag (a): welke kwaliteit wordt er verlangd?

Systeemanalytisch werk kan voorts een belangrijke contributie leveren in de aanpak van vraag (b): hoe bereikt men (ontwerp, uitvoering) en hoe handhaaft men

(operationeel beheer van bestaand systeem) op optimale wijze (10 → 8) de onder (a) verkregen doelstellingen.

Tenslotte wijst het relatiediagram erop, dat naast de landbouw, eigenlijke wijzigingen van het milieu geschieden middels werken ontworpen, gebouwd en beheerd door ingenieurs (8 → 9); alle andere relaties voeren voornamelijk informatie. Nogmaals, afb. 1 geeft een geïdealiseerd beeld van de rol van systeemanalyse in het milieubeheer. Systeemanalyse is duur en vraagt tijd. Vanwege de vaak kwalitatieve en lange-termijn opbrengst kunnen skepsis, ongeduld, en overmatig vertrouwen op intuïtie het ongestraft opzij drukken.

Illustratief: systeemanalyse in enge zin

Ter illustratie van systeemanalyse in enge zin is een voorbeeldje van een optimalisatie model geformuleerd. Met een lineaire doelstellingsfunctie in 17 variabelen, onderworpen aan 29 gelijkheids- en ongelijkheidsbeperkingen is dit slechts een 'klein' probleem ten aanzien van de gekozen optimalisatiemethode. Indien het probleem dynamisch zou worden bezien met de gebruikelijke tijdsstap van 7 dagen, loopt het aantal variabelen potentieel op tot 884. Dit zou nog steeds heel redelijk zijn in berekeningskosten.

Het voorbeeld illustreert het gebruik van variabele marginale kosten en van de economische efficiënte doelstelling en enige afweging met andere doelstellingen via de legale en politieke limieten. De in de besluitsfeer te presenteren resultaten omvatten de door het systeem gegenereerde schaduw prijzen.

Het voorbeeld is uiteraard niet vrij van vereenvoudigingen. Deze kunnen verwijderd worden. Ook is het model nog betrekkelijk klein. Een ervaren ingenieur kan heel wel een goede oplossing vinden zonder formele optimalisatie. Het punt is evenwel dat *eenzelfde* man met formele methoden en de daarbij beschikbare gevoeligheidsanalyse beter werk levert dan hij zou verkrijgen met intuïtieve methoden. Het betere is o.m. gelegen in de manier waarop hij dan voor het besluitproces relevante informatie kan aandragen.

1. *Systeem:*

Gedeelte van een rivier met 3 afvalwaterlozingen van L_i [kg/dag], $i = 1, 2, 4$, die slechts voorbezinking hebben met 30 % BOD verwijdering (zie afb. 2). Afvalwater zuiveringskosten en baten worden gelineairiseerd als in afb. 3 en 4. Met het Streeter-Phelps Model voor DO zijn de overdrachtscoëfficiënten berekend. Zij zijn d_{ij} [mg/L] = te verwachten vermeerdering in zuurstof-

gehalte bij j door zuivering bij i ($j > i$). De overheid stelt als minimum eis een DO van q_{\min} [mg/L · O₂]. De huidige kwaliteiten zijn q_j , $j = 2, 3, 4, 5$.

2. Gestelde Vraag:

Welke combinatie van extra verwijderingspercentages X_i — 30, $i = 1, 2, 4$, die voldoet aan alle gegeven en aan te geven limieten geeft een maximaal verschil tussen baten B_j , $j = 2, 3, 4, 5$ en kosten K_i , $i = 1, 2, 4$.

3. Objectief Functie:

$$\text{MAX } [U] = \text{MAX } [\sum_j B_j - \sum_i K_i] \equiv \text{doelstelling} \quad (1)$$

onderworpen aan

$$X_i \geq 30[\%]; q_j \geq q_{\min} = \text{legale limieten} \quad (2, 3)$$

4. Limieten:

$$0 \leq x_{ki} \leq x'_{ki} - x'_{k-1,i}; 0 \leq q_{kj} \leq q'_{kj} - q'_{k-1,j} \quad (4, 5)$$

5. Productie Functie:

Verwijderings Percentage

$$X_i = 30 + \sum_k x_{ki} \quad (6)$$

Verwijdering door extra zuivering:

$$\Delta L_i [\text{Kg BOD}] = \sum_k L_i x_{ki} / 100 \quad (7)$$

Effect van extra zuivering door i voor j :

$$\Delta q_{ij} = d_{ij} \Delta L_i \quad (8)$$

De DO kwaliteit wordt dan:

$$q_j = \bar{q}_j + \sum_i \Delta q_{ij} \quad (9)$$

(productie functie = relatie tussen systeem invoer en uitvoer)

6. Kosten:

Marginale Kost

$$MK_i = c_{ki} x_{ki}, i = 1, 2, 4; k = 1, 2, 3 \quad (10)$$

Totale kost

$$K_i = \sum_k c_{ki} x_{ki} [\text{Fl}] \quad (11)$$

7. Baten:

Marginale Baten

$$MB_j = b_{kj} q_{kj}, j = 2, 3, 4, 5; k = 1, 2 \quad (12)$$

Totale Baten

$$B_j = \sum_k b_{kj} q_{kj} [\text{Fl}] \quad (13)$$

8. Politieke Limieten:

$$B_i - K_i \geq -PL_i [\text{Fl}], i = 1, 2, 4, 6 \quad (14)$$

waar $i = 6$ de overheid aanduidt (interesse in nationaal inkomen effect)

9. L.P. probleem:

$$\text{MAX } [\sum_j \sum_i (b_{kj} q_{kj} - c_{ki} x_{ki})]; j > i \quad (15)$$

onderworpen aan Vg. 3, 4, 5, 9, 11, 14. Dit geeft een lineair programmeringsprobleem in 17 variabelen, onderworpen aan 29 gelijkheids- en ongelijkheidsvergelijkingen. Oplossing met standaard SIMPLEX routine in elk rekencentrum.

10. Oplossing:

Is Pareto-acceptabel; voldoet aan technische, legale en politieke eisen; toont alle schaduw-prijzen van de limieten; $\Delta U / \Delta L$ [Fl/eenheid_L] ($L \equiv$ limiet).

Literatuur, adviezen

Aangezien het onderwerp hier te lande nog niet geregeld in cursussen of artikelen wordt aangetroffen kan het nuttig zijn wat literatuur te noemen in de vorm van gemakkelijk te verkrijgen en te verwerken tekstboeken, in het algemeen met oefenproblemen. Voor tekstboeken gericht op een bepaald concreet systeem is het watersysteem gekozen. In de laatste tien jaar zijn er voorts meerdere, meest kleine systeemanalyse adviesbureaus gevormd. Deze kunnen het beginnen van een kern van systeemanalytische competentie bevorderen.

A. Systeembegrippen, -benadering, -analyse

1. 'Design of Water Resource Systems', A. Maass, et al., Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass., USA (1962). Het nu klassieke onderzoek rapport dat de stoot gaf tot watersysteemanalyse.

2. 'Systems Analysis for Engineers and Managers', R. de Neufille and J. H. Stafford (353 pg), McGraw Hill, (1971). Uitstekende elementaire introductie tot systeemanalyse voor civiel ingenieurs.

3. 'Design and Planning of Engineering Systems', D. D. Meredith et al (393 pg), Prentice-Hall (1973). Elementair, enigszins oppervlakkig tekstboek met introductie tot systeemanalyse; goed uitgevallen nadruk op netwerken.

4. 'Systems Analysis and Design', R. J. Aquilar (405 pg) Prentice-Hall (1973). Elementaire introductie; aandacht voor aannemers problemen.

5. 'Water Resources Systems Engineering', W. A. Hall and J. Dracup (372 pg) McGraw Hill (1970). Heeft enkele goede hoofdstukken. Behandeling is niet geheel evenwichtig.

6. 'Scientific Allocation of Water Resources', N. Buras (209 pg), American Elsevier Comp. (1970). Niet elementair maar wel goed overzicht van watersysteemanalyse.

7. 'Environmental Systems Engineering', Linvil G. Rich (448 pg), McGraw Hill (1973). Standaard gezondheidstechniek materiaal overgoten met systeemanalyse saus; zeer leesbaar; eenvoudige algoritmen (Fortran IV).

8. 'Trends in General Systems Theory', G. J. Klir (editor), (462 pg). Wiley-Interscience (1972). Zorgvuldig bewerkte compilatie van beschouwingen over 'Algemene Systeem Theorie'.

B. Simulatie

9. 'Systems Simulation', G. Gordon, (303 pg), Prentice-Hall (1969). Een introducerende tekst over simulatie modellen.

10. 'Principles of Systems', Jay W. Forrester, (392 pg), Wright-Allen Press (1968). De originele introductie tot 'Industrial Dynamics', een simulatie aanpak die gebruik maakt van gekoppelde eerste orde differentiaalvergelijkingen. Een precompiler

maakt het mogelijk alle attentie te richten op beschrijvende modelbouw.

C. Systeem, Identificatie, Optimalisatie en verdere Technieken.

11. 'Time Series Analysis - Forecasting and Control', G. E. P. Box en G. M. Jenkins, (553 pg), Holden-Day. De beste tekst voor (stochastische) model identificatie analyse; redelijk toegankelijk.

12. 'Mathematical Foundations for Design: Civil Engineering Systems', R. M. Stark and R. L. Nicholls (566 pg), McGraw Hill (1972). Beste elementaire tekst over optimalisatie technieken toegepast op situaties uit de civiele techniek.

13. 'Introduction to Systems Engineering: Deterministic Models', T. Au and T. E. Stelson (374 pg), Addison-Wesley (1969). Uitstekende elementaire introductie tot optimalisatie methoden en toepassingen.

14. 'Introduction of Operations Research', F. S. Hillier and G. J. Lieberman (639 pg), Holden-Day (1967). Klassieke introductie tot operationele analyse technieken; vrij gemakkelijk toegankelijk.

15. 'Foundations of Optimization', D. J. Wilde and C. S. Beightler (480 pg), Prentice Hall (1967). Nu klassiek geworden introductie tot optimalisatie methoden, zeer leesbaar.

16. 'Probability, Statistics, and Decisions for Civil Engineers', J. R. Benjamin and C. A. Cornell, (630 pg), McGraw Hill (1973). Uitstekende, complete introductie tot de statistiek en stochastiek toegepast op het civiele vak; niet overal elementair.

D. Evaluatie

17. 'Managing Water Quality: Economics, Technology, Institutions', A. V. Kneese and B. T. Bower (328 pg), Johns Hopkins Press, Baltimore (1968). Klassiek werk op het gebied van waterkwaliteit en systeemanalyse en -evaluatie.

18. 'Economics of Water Resources Planning', L. D. James and R. R. Lee (615 pg), Addison-Wesley (1969). Een goede elementaire introductie tot project evaluatie.

19. 'Benefit-Cost Analyses for Water Planning', C. W. Howe (144 pg), Amer. Geophysical Union, Washington DC, (1971). Elementaire introductie tot batenkosten analyse voor watersystemen.

20. 'Guidelines for Project Evaluation', P. Dasgupta, A. Sen en S. Marglin (383 pg), United Nations (UNIDO) no. E. 72. II. B. 11 (1972). Baten - kosten analyse (ook betrokken op projecten in de publieke sector); voor meer gevorderden.

