

Productievermogen en bedrijfszekerheid

Wanneer men de gang van zaken bij het ontwerpen van een waterzuiveringsinstallatie nagaat, komt men spoedig tot de conclusie, dat het ontwerpende team — verder te noemen: de ontwerper — niet alleen over grote kennis en ervaring, een gezonde visie en voldoende creatief vermogen moet beschikken, maar evenzeer over eigenschappen, welke het in staat stellen om uit de vele mogelijkheden en combinaties van mogelijkheden een aantal reële alternatieven te destilleren, welke een nader onderzoek waard zijn.

In de verschillende fasen van het (voor)ontwerp zal de ontwerper zich een schema als weergegeven in afb. 1 min of meer bewust voor ogen houden. Het schema toont een aantal aspecten en factoren, welke bij elk ontwerp een rol zullen spelen. De moeilijkheid voor de ontwerper is, dat de factoren elkaar onderling sterk kunnen beïnvloeden.

Waterverbruik (verbruikspatroon), „design period” (het tijdvak, dat verloopt tot de volgende uitbreiding in bedrijf is gesteld), productievermogen en bedrijfszekerheid zijn daarvan voorbeelden.

Bij het afwegen van voor- en nadelen en het zoeken naar een aanvaardbaar compromis zal men uiteraard streven naar optimalisering. In alle gevallen zal men daarbij ook het beleid op wat langere termijn moeten betrekken. Men zal tevens trachten te onderzoeken hoe de verschillende oplossingen zich zullen gedragen, indien in de toekomst de omstandigheden zich eens zouden wijzigen. Soms zal men dan de voorkeur geven aan een oplossing, welke een betrekkelijk vlakke optimaliseringskromme vertoont, boven een oplossing, welke alleen in een beperkt gebied optimale resultaten levert, doch daarbuiten snel ongunstiger wordt, m.a.w. men kiest dan binnen het raam der mogelijkheden de oplossing, welke ook bij veranderde omstandigheden niet te ver van het theoretisch optimum verwijderd is.

Bij de optimaliseringsprocedure wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van quantitative gegevens en veronderstellingen. Een van die quantitative gegevens is het productievermogen van de installatie.

Er zal evenwel slechts weinig van het optimaliseringsprincipe terechtkomen, wanneer de ontwerper bij het bepalen van de afmetingen van de te bouwen installatie een zodanige veiligheidsmarge in acht neemt, dat de feitelijke productiecapaciteit in de praktijk, zelfs bij een redelijke mate van bedrijfszekerheid, enige tientallen procenten hoger blijkt te liggen dan het productievermogen, waarvoor de installatie is ontworpen. Het gevolg van een dergelijke overdimensionering zal zijn, dat de berekende optimaliseringskromme niet meer representatief is voor het betreffende ontwerp. De kans, dat de juiste keuze uit de beschikbare alternatieven wordt gedaan, neemt aanzienlijk af.

Niemand zal bezwaar hebben tegen het in acht nemen van een redelijke veiligheidsmarge, doch er dient te worden gewaakt tegen accumulatie van veiligheidsmarges en

veiligheidsfactoren. Productievermogen en bedrijfszekerheid dienen dan ook aanvankelijk afzonderlijk te worden geanalyseerd en pas in een later stadium van het ontwerpproces op elkaar te worden afgestemd. Alleen op deze wijze zal een harmonieus ontwerp tot stand kunnen komen.

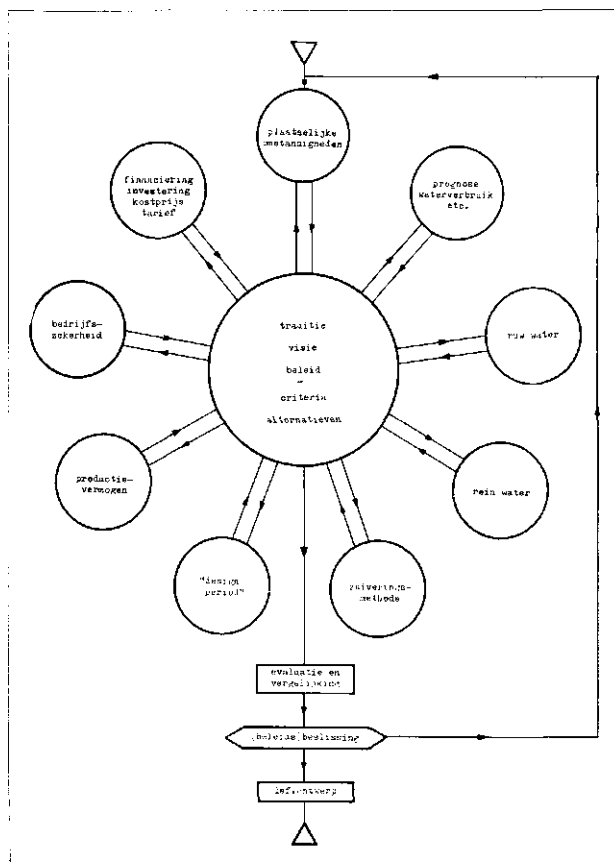
In het volgende zullen enige aspecten van productievermogen en bedrijfszekerheid worden behandeld.

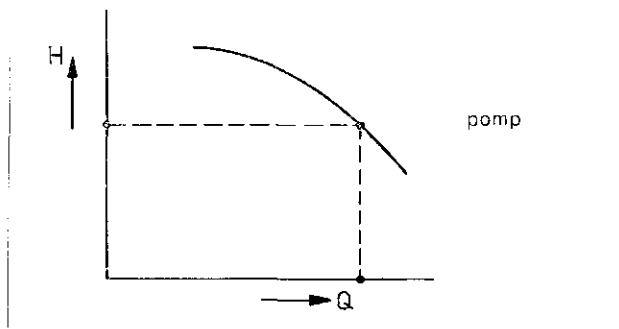
1. Productievermogen

Onder productie van drink- en/of industriewater wordt over het algemeen verstaan het systeem van handelingen, dat erop gericht is het ruwe water te winnen en daarna zodanig te bewerken, dat het geschikt is voor aflevering aan de verbruikers. Water is pas gereed voor aflevering aan de verbruiker, wanneer het behalve aan zekere kwaliteitseisen ook nog voldoet aan de eis van voldoende druk.

Dat behalve de waterwinningsmiddelen en de zuiveringsinstallatie ook het hogedruk pompstation tot de productie-installatie wordt gerekend is daarom alleszins begrijpelijk. Doorgaans wordt evenwel ook de reinwaterberging, voorzover deze op het terrein van de zuiveringswerken is gelegen, tot de productie-installatie gerekend.

Afb. 1 - Wisselwerking tussen verschillende factoren in de ontwerpfase.





Afb. 2 - Druk als functie van belasting.

Wij komen hierdoor in grote moeilijkheden bij de definiëring van het begrip productievermogen.

Er dient een duidelijk verschil te worden gemaakt tussen productievermogen en leveringsvermogen.

Onder *productievermogen* van een productie-installatie (zuiveringsinstallatie) zou ik willen verstaan de hoeveelheid water in m^3/h van aanvaardbare kwaliteit, welke gemiddeld over een bepaalde tijdsduur maximaal kan worden gewonnen en gezuiverd. Of voldoende reinwaterberging beschikbaar is om al het geproduceerde water op te slaan moet buiten beschouwing blijven.

Onder *leveringsvermogen* van een productie-installatie zou men dan kunnen verstaan de hoeveelheid water in m^3/h van aanvaardbare kwaliteit en voldoende druk, welke gemiddeld over een bepaalde tijdsduur maximaal aan het leidingnet kan worden afgeleverd. Of de verbruikers dit aanbod kunnen adsorberen en of het leidingnet voldoende capaciteit heeft, is in dit verband niet relevant.

In deze omschrijvingen is de toevoeging „over een bepaalde tijdsduur” van essentiële betekenis. Beschouwt men het productievermogen over een korte periode, bijvoorbeeld één uur, dan kan dit enige procenten hoger liggen dan het productievermogen over een periode van twee of meer etmalen. Wij zouden het productievermogen, bepaald over een periode van één enkel uur en onder gunstige omstandigheden, d.w.z. in de veronderstelling, dat alle onderdelen van de productie-installatie (tot aan de reinwaterberging) naar behoren functioneren het *maximum productievermogen* (uit te drukken in m^3/h) kunnen noemen. Wordt de periode, waarover het gemiddelde van de productie wordt bepaald, zolang genomen, dat een volledige cyclus kan worden afgewerkt van filterspoelingen en andere regelmatig terugkerende processen, welke de productie tijdelijk verminderen, dan zouden we dit gemiddelde simpelweg het *productievermogen* van de installatie kunnen noemen.

Soms zullen wij in verschillende seizoenen van het jaar, bijvoorbeeld bij een wisselende samenstelling van het ruwe water, verschillende waarden van het productievermogen constateren. In dat geval dienen wij duidelijk te vermelden, op welk seizoen het opgegeven productievermogen betrekking heeft.

Principieel is, dat bij het bepalen van het productievermogen de grootte van de reinwaterberging buiten beschouwing blijft. Dit is niet het geval bij het leveringsvermogen. Het leveringsvermogen van een productie-installatie (derhalve inclusief reinwaterberging) kan — en moet — over een korte periode (bijvoorbeeld één uur)

enige malen groter zijn dan het productievermogen. Over een aanmerkelijk langer tijdvak gerekend, zullen doorgaans leveringsvermogen en productievermogen gelijk worden, omdat het leveringsvermogen over een langer tijdvak uiteindelijk beperkt wordt door de maximaal te produceren hoeveelheid water. Soms wordt het leveringsvermogen betrokken op een lange periode (bijvoorbeeld één jaar) gelimiteerd door de capaciteit van de waterwinplaats (grondwater) of de hydrologische situatie van een rivier of meer (oppervlakte water). Het is dan ook noodzakelijk duidelijk aan te geven, op welke tijdsduur en eventueel op welk seizoen het leveringsvermogen wordt betrokken. Tenslotte dient te worden bedacht, dat het leveringsvermogen over een tijdvak van bijvoorbeeld één etmaal ook sterk afhankelijk zal zijn van het afnamepatroon van het betrokken voorzieningsgebied.

Een productie-installatie bestaat uit meerdere productiefasen (bijvoorbeeld winning, lagedrukpomstation, coagulatie, filtratie, desinfectie enz.). Elke fase is doorgaans weer samengesteld uit een aantal afzonderlijke eenheden, welke parallel werken.

Bij de eigenlijke zuiveringsfasen worden meestal eenheden gebruikt van onderling gelijke afmetingen en capaciteit. Voor de pomphasen is dit over het algemeen niet het geval.

Teneinde het toelaatbare maximum en gemiddeld productievermogen van een ontworpen installatie zo goed mogelijk te voorspellen is kennis van de gedragingen van de afzonderlijke eenheden onder uiteenlopende omstandigheden noodzakelijk.

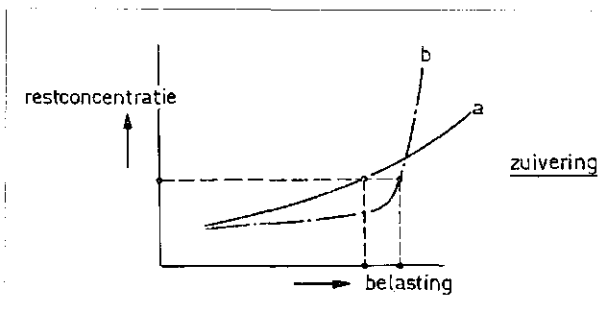
Soms kunnen de daarvoor noodzakelijke basisgegevens gemakkelijk worden verkregen, hetzij op grond van gedocumenteerde offertes (bijvoorbeeld Q-H-krommen van pompen), hetzij op grond van ervaring en theorie capaciteit en drukverliezen in buisleidingen, kanalen enz.).

Het geven van een betrouwbare voorspelling van de toelaatbare capaciteit van de eigenlijke zuiveringsfasen is daarentegen veel moeilijker.

Indien men niet beschikt over een reeds in bedrijf zijnde installatie van hetzelfde type, dat moet worden beschouwd, of, zo dit wel het geval is, de omstandigheden anders zijn, is men aangewezen op de resultaten van een proefinstallatie op technische schaal.

Weliswaar kunnen theorie en laboratoriumproeven een belangrijke bijdrage leveren bij het samenstellen van het voorontwerp, en richting geven aan verder onderzoek, doch de realiteit gebiedt op te merken, dat alleen proeven op werkelijk technische schaal uiteindelijk de gegevens en criteria kunnen verschaffen, waarop het definitieve ontwerp kan worden gebaseerd.

Afb. 3 - Kwaliteit als functie van belasting.



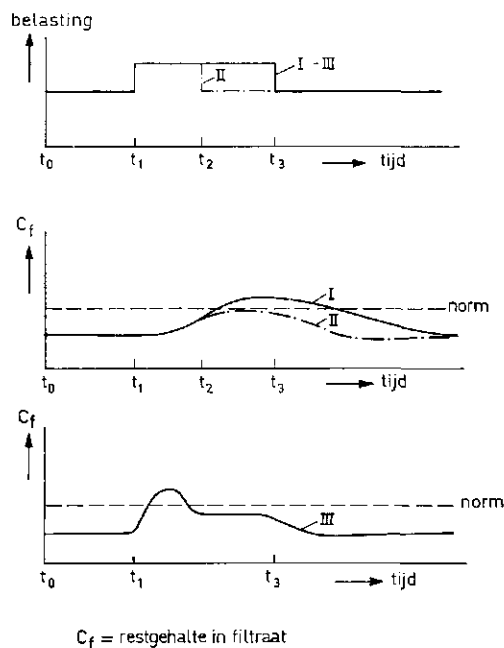
Voor een enigszins betrouwbare capaciteitsbepaling van filters is n.m.m. een proefinstallatie met een vermogen van minimaal 10 à 20 m³/h noodzakelijk. Voor coagulatie- en bezinkingsprocessen zou ik zelfs een groter vermogen van de proefopstelling willen aanbevelen, omdat hier schaafeffecten een nog belangrijker rol spelen. Ook met desinfectieprocessen en met proefnemingen op het gebied van ontsmeking zal men langdurig moeten experimenteren op behoorlijke schaal, voordat verantwoorde conclusies kunnen worden getrokken. Evenals voor een pomp, welke bij een bepaald debiet een bepaalde opvoerhoogte (te vergelijken met de „kwaliteit” van het afgeleverde produkt) kan leveren (afb. 2), zal meestal uit de waarnemingsresultaten van de betreffende zuiveringsfase een verband kunnen worden afgeleid tussen de capaciteit per eenheid van oppervlakte (of eventueel per eenheid van inhoud) en de kwaliteit van het effluent of het zuiveringsrendement.

Doorgaans zal de restconcentratie van stoffen, welke tijdens de zuivering moeten worden verwijderd, toenemen bij toenemende capaciteit. In afb. 3 geven de krommen a en b zulk een verband weer. Kromme a is in het algemeen representatief voor filters: een relatief grote toeneming van de filtratiesnelheid (oppervlaktebelasting) resulteert in een slechts relatief geringe of soms zelfs geheel verwaarloosbare toeneming van de restconcentratie in het filtraat. Krommen van het type b worden gevonden voor coagulatie- en bezinkingsprocessen. Hierbij is over het algemeen het doorslagpunt duidelijker te bepalen, want een kleine toeneming van de oppervlaktebelasting veroorzaakt meestal reeds een aanmerkelijke toeneming van de restconcentratie in het effluent. Overigens zal men steeds moeten bedenken, dat het zuiveringsrendement van een deelbehandeling of van het gehele zuiveringsproces als zodanig mede kan worden beïnvloed door fluctuaties van de oppervlaktebelasting, welke het gevolg zijn van de nu eenmaal noodzakelijke afstemming van de productie op het waterverbruik.

Een tijdelijke verhoging bijvoorbeeld van de filtratiesnelheid van een filter kan aanleiding geven tot zodanig verhoogde concentraties van een bepaalde stof in het effluent, dat de norm wordt overschreden (afb. 4, geval I). Soms ook leidt een kortstondige verhoging van de filtratiesnelheid, in feite een „overbelasting” zijnde, net niet tot overschrijding van de norm (afb. 4, geval II). Ook kan zich het geval voordoen (afb. 4, geval III), waarbij zich na een aanvankelijke ongewenste verhoging van de restconcentratie C_f in het filtraat een zeker herstel manifesteert, nadat zich een nieuw evenwicht heeft ingesteld. In al deze gevallen is sprake van een zekere naijling, welk verschijnsel zich ook bij coagulatieprocessen kan voordoen.

In omstandigheden als van geval III kan wellicht met succes gebruik worden gemaakt van het recirculatieprincipe. Hierbij wordt een deel van het filtraat naar de ruwwatertoevoer teruggevoerd, waardoor het mogelijk is de werkelijke filtratiesnelheid bij wisselende productie constant te houden en daarmee het hydrodynamische evenwicht in het filter op eenzelfde peil te handhaven. In de afvalwaterzuiveringstechniek wordt recirculatie veelvuldig toegepast, in de waterleidingstechniek zijn slechts incidentele toepassingen bekend, welke evenwel goede resultaten leveren.

Tenslotte moet worden gewezen op het niet te loochenen



Afb. 4 - Kwaliteit als functie van tijd en belasting: naijlingsverschijnselen.

feit, dat — anders dan bijvoorbeeld bij de beproeving van een pomp — de reproduceerbaarheid van metingen en experimenten zelfs bij constante samenstelling van het ruwe water dikwijls te wensen overlaat. Weliswaar kan, hoe meer waarnemingen ter beschikking staan, een des te beter inzicht worden verkregen omtrent de meest waarschijnlijke ligging en vorm van de „capaciteits-kwaliteitskromme”, maar desondanks blijft „eliminatie” van eventuele uitschieters uit een waarnemingsreeks een hachelijke zaak, vooral indien men geen verantwoorde verklaring voor de incidentele afwijkingen kan geven.

Omdat in de praktijk steeds meerdere eenheden parallel zullen functioneren, is evenwel de kans, dat bij meer dan één eenheid gelijktijdig incidentele tekortkomingen in het effluent zullen optreden, doorgaans gering. Bij de interpretatie van waarnemingen zal men dan ook het beginsel moeten huldigen, dat enig risico aanvaardbaar is bij de vaststelling van het toelaatbaar maximum productievermogen op grond van proeven op semi-technische schaal. Veel moeilijker wordt het een schatting van de toelaatbare maximum capaciteit te geven, indien het beschikbare ruwe water niet van constante samenstelling

Afb. 5

Invloed van de watertemperatuur

biologische filters	+++
spaarbekkens	+++
bezinkingsinrichtingen	+++
flocculatie-, coagulatieinrichtingen	++
desinfectiesystemen	++
koelfilters	+
snelfilters	+
ontgassingssystemen	(+)
beluchtingssystemen	—

In dit overzicht betekent:

— lager rendement, c.q. capaciteit bij hogere temperatuur

+ hoger rendement, c.q. capaciteit bij hogere temperatuur

Invloed van de watertemperatuur

viscositeit	-----
weerstandverliezen	---
bezinksnelheid	+++
reactiesnelheid (chemisch)	+
reactiesnelheid (biologisch)	+++
oplosbaarheid van gassen	-----
oplosbaarheid van vaste stoffen, doorgaans	+(+)
adsorptiesnelheid	++
adsorptievermogen	---
kalk-koolzuurevenwicht	verschuift

In dit overzicht betekent:

- verlaging bij hogere temperatuur
- + verhoging bij hogere temperatuur

Afb. 6

en temperatuur is. Met deze moeilijkheid kampen alle oppervlaktewaterbedrijven in meer of mindere mate. Gesloten buffering (kunstmatige infiltratie) en open buffering (spaarbekkens), zonder welke thans in Nederland oppervlaktewinning ondenkbaar is geworden, hebben wel een duidelijk afvlakkend en egaliserend effect op de kwaliteit van het water, maar vooral bij de toepassing van spaarbekkens zullen seizoensinvloeden duidelijk merkbaar blijven. De werking van spaarbekkens is immers afhankelijk van biologische processen, welke vooral door de watertemperatuur worden beïnvloed.

De temperatuur van het water speelt in veel opzichten een min of meer belangrijke rol. Afb. 5 geeft hiervan een schematisch overzicht.

Voor ons is het meest van belang, dat bij hoge temperaturen:

- de bezinksnelheid toeneemt als gevolg van de lagere kinematische viscositeit van het water;
- biologische processen (afbraak van ammoniak en organische stoffen) sneller en beter verlopen als gevolg van verhoogde biologische activiteiten.

Een samenvatting van de invloed van de watertemperatuur op verschillende deelbehandelingen is gegeven in afb. 6.

Voorlopig is nog geen reële oplossing te geven om de verminderde biologische activiteit in spaarbekkens gedurende koude-perioden en alle gevolgen van dien (verminderde capaciteit en zuiveringsrendement) te onderwerpen.

Voor biologische filters zou in principe een halt kunnen worden toegeroepen aan vermindering van het zuiveringsrendement door verwarming van het ruwe water met bijvoorbeeld aardgas. De kosten hiervan zouden kunnen worden geraamd op gemiddeld 1 à 2 cent per afgeleverde jaar-m³. Bedrijven met langzame filters doen er voorts verstandig aan de filters voor het ingaan van de winter schoon te maken. De biologische werking kan bij water met een temperatuur van 5 à 6° C nog vrij spoedig worden hersteld, terwijl dit niet het geval is bij nog lagere watertemperaturen. Een en ander is uitgebeeld op afb. 7. In verband met dit verschijnsel zou men zich kunnen afvragen of niet zelfs een intermitterend werkende opwarming van het water (bijvoorbeeld slechts gedurende enkele uren per etmaal of enkele dagen per week) een bijdrage tot vermindering van een teruggang van het zuiveringsrendement van langzame filters zou kunnen leveren.

De toelaatbare maximum capaciteit van bezinkingssystemen loopt bij afnemende watertemperatuur duidelijk terug. Dit is ook het geval bij coagulatie-inrichtingen. Hier heeft men evenwel de mogelijkheid de dosering van chemicaliën aan te passen aan de omstandigheden. Vooral het doseren van coagulatiehulpmiddelen is een efficiënte methode om capaciteitsverlies in koudere perioden tegen te gaan.

Bij desinfectieprocessen dient men terdege rekening te houden met de noodzaak tot langere verblijftijden bij lagere temperaturen van het water. Voor breekpuntchloring wordt doorgaans de verblijftijd van het water in de contactreservoirs bij 0° C anderhalf maal zo groot gekozen als bij een watertemperatuur van 20° C.

Hoewel men op grond van laboratoriumproeven en mathematische filtratietheorieën anders zou verwachten, is de invloed van de temperatuur van het water op capaciteit en zuiveringsrendement van snelfilters met hier te lande gebruikelijke filtratiesnelheden van 4 tot 8 m/h in de praktijk niet of nauwelijks merkbaar. Deze constatering wordt o.m. bevestigd door een aantal waarnemingen aan de voorfilters te Leiduin [1], aan schrijver dezes welwillend door de Gemeentewaterleidingen van Amsterdam ter beschikking gesteld. IJzer en ammoniak worden bij temperaturen van 2° C en bij aldaar gebruikelijke snelheden van ca. 5 à 7 m/h in vrijwel dezelfde mate verwijderd als in warmere perioden.

Het is echter niet ondenkbaar, dat bij hogere filtratiesnelheden (boven 10 à 12 m/h) de ongunstige invloed van lagere watertemperaturen op het zuiveringsrendement van snelfilters in de praktijk merkbaar zal worden.

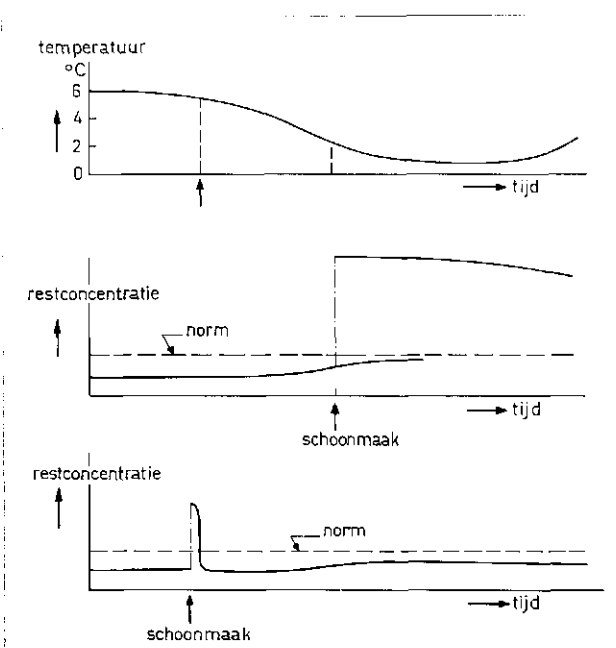
Intussen zal uit het bovenstaande wel duidelijk zijn geworden, dat in het merendeel der gevallen het aanleggen van objectieve maatstaven bij de aanneming van een toelaatbare maximum capaciteit van een bepaalde zuiveringseenheid van gegeven constructie en afmetingen illusoir is, zelfs indien wordt beschikt over een lange reeks van waarnemingen. De persoonlijke visie en ervaringen van de ontwerper, derhalve grotendeels subjectieve maatstaven, zullen de doorslag blijven geven. Het is evenwel belangrijk te onderkennen, dat bij de opgave van de toelaatbare maximum capaciteit slechts een uiterst geringe veiligheidsmarge (enige procenten) in aanmerking mag worden genomen. Is eenmaal de toelaatbare maximum productiecapaciteit van een ontworpen installatie op bovengenoemde wijze bepaald, dan moet worden nagegaan, bij welk nominaal vermogen een voldoende mate van bedrijfszekerheid naar verwachting kan worden gerealiseerd.

Bedrijfszekerheid

2. Algemene opmerkingen

De bedrijfszekerheid van een productie-installatie is o.m. afhankelijk van de volgende factoren:

- de plaatselijke omstandigheden;
- het algemeen bedrijfsbeleid;
- het waterverbruik en de wisselingen daarvan in de tijd;
- beschikbaarheid en hoedanigheid van het ruwe water;
- kwaliteit van de gebruikte materialen en wijze van uitvoering;
- ouderdom en staat van onderhoud van de installatie;



Afb. 7 - Invloed van het tijdstip van schoonmaak op het rendement van het langzame filter.

- bekwaamheid, ervaring, improvisatievermogen en niet te vergeten de arbeidsvreugde en loyaliteit van het leidinggevend, bedienend en overig uitvoerend personeel;
- de kwaliteit van het ontwerp.

In het volgende is gezien het onderwerp van deze cursus voornamelijk aandacht geschonken aan de zo belangrijke invloed van het ontwerp op de bedrijfszekerheid. De ontwerper dient dan ook terdege rekening te houden met de eisen ten aanzien van de bedrijfszekerheid. Elke exploitant van een zuiveringsinstallatie staat immers machteloos, indien niet reeds in de ontwerpfase aan de verschillende aspecten van de bedrijfszekerheid voldoende aandacht is besteed.

In het ontwerp moet dan ook een gamma van mogelijkheden worden opgenomen, welke de latere gebruiker van de installatie in staat stellen de gevolgen van een eventueel optredend defect in enig onderdeel geheel te onderwerpen of althans tot aanvaardbare proporties terug te brengen.

In het ontwerpstadium zal een systematische analyse met betrekking tot de bedrijfszekerheid niet mogen ontbreken. De moeilijkheid bij een dergelijke analyse is, dat objectieve gequantificeerde criteria voor de bedrijfszekerheid geheel ontbreken, terwijl richtlijnen voor het bereiken van een voldoende bedrijfszekerheid, voor zover zij voorhanden zijn, over het algemeen zeer summier zijn.

Zulks is ook begrijpelijk, wanneer men bedenkt, dat de omstandigheden van plaats tot plaats en van dag tot dag kunnen verschillen en quantitative gegevens over de storingskansen van pompen, filters, afsluiters e.d. niet of in onvoldoende mate beschikbaar zijn. Men dient zich dan ook te realiseren, dat een meer objectieve en theoretische benadering van het bedrijfszekerheidsvraagstuk, waarbij de bedrijfszekerheid quantitatief wordt bepaald, voorshands alleen mogelijk is op grond van een groot aantal aannamen en veronderstellingen. Uitsluitel om-

trent de absolute mate van bedrijfszekerheid zal men niet kunnen verkrijgen, maar het zou reeds een winstpunt zijn, indien wij bij machte waren de bedrijfszekerheid van alternatieve ontwerpen beter met elkaar te vergelijken.

Zulks zou in principe mogelijk zijn met behulp van mathematische bedrijfszekerheidsmodellen, welke met een computer worden doorgerekend. De theorie van deze werkwijze kan worden ontleend aan het vakgebied van de „reliability engineering”, dat de laatste jaren vooral in de Verenigde Staten een enorme ontwikkeling heeft doorgemaakt. De specialisten, die op dit gebied werkzaam zijn, zijn voornamelijk betrokken bij militaire en ruimtevaartprojecten. Met name de vliegtuigfabrieken en de elektronische industrie hebben een enorme stoot gegeven tot de verdere ontwikkeling en vooruitgang van deze jonge tak van wetenschap. Zonder computers zou zulk een ontwikkeling ondenkbaar zijn geweest.

Wij zullen onze kennis dan ook voornamelijk moeten ontlenen aan beschouwingen en theorieën in de genoemde vakgebieden, want schrijver dezes is er niet in geslaagd literatuur te achterhalen, welke specifiek betrekking heeft op de theorie van de bedrijfszekerheid van zuiveringsinstallaties. Men zou op het eerste gezicht geneigd zijn te oordelen, dat bedrijfszekerheidstheorieën voor verschillende vakgebieden elkaar wel niet veel zullen ontlopen. Inderdaad is dit ook het geval, zolang het de principiële benadering van het bedrijfszekerheidsvraagstuk betreft. Zodra evenwel op details van berekeningswijzen wordt ingegaan, blijkt, dat de mathematische uitwerking, waarbij veelvuldig wordt gebruik gemaakt van exponentiële functies, minder toegankelijk is voor niet-specialisten in „reliability engineering”. Schrijver heeft dan ook gemeend de mathematische berekeningswijzen op een eenvoudiger leest te moeten schoeien, omdat deze voor velen beter te begrijpen zijn en mede daardoor gemakkelijker een beter inzicht in het bedrijfszekerheidsvraagstuk wordt verkregen.

De daaruit voortvloeiende grotere onnauwkeurigheid in de resultaten moet dan op de koop toe worden genomen. Gebruik makend van de mathematische bedrijfszekerheidstheorie zullen wij in principe in staat zijn om te komen tot een meer objectieve en daarom meer verantwoorde keuze uit alternatieve ontwerpen dan mogelijk is op grond van alleen een sterk subjectieve analyse van de bedrijfszekerheid, welke is gebaseerd op intuïtie, technisch gevoel en ervaring van de ontwerper.

Zolang evenwel de basisgegevens geheel of gedeeltelijk ontbreken of de nauwkeurigheid daarvan te wensen overlaat, zullen we van de mathematische theorie niet meer mogen verwachten dan een controle- en correctiemiddel op intuïtie, technisch gevoel en ervaring van de ontwerper.

Het voordeel van de toepassing van de mathematische bedrijfszekerheidstheorie moet daarom eerder worden gezocht in de bevordering van een gezond denkproces bij de ontwerper en van een meer systematische en minder gevoelsmatige aanpak van het vraagstuk dan in de misschien in theorie bestaande mogelijkheid van een quantitative voorspelling van de bedrijfszekerheid.

Uitdrukkelijk wordt gesteld, dat het alleen zin heeft om ons te gaan wijden aan de mathematische bedrijfszekerheidstheorie, wanneer wij het bovenstaande steeds goed voor ogen houden.

Bedrijfszekerheid is:	Voorbeelden van toepassing
1. kans, dat systeem naar behoren zal functioneren gedurende tijdvak T (geen reparatie) „Reliability”	Onbemande raketten
2. kans, dat systeem naar behoren functioneert op tijdstip t_1 én na t_1 gedurende tijdvak T (geen reparatie). „Interval reliability”	Maanvoertuigen
3. kans, dat systeem naar behoren functioneert op willekeurig tijdstip t (in gegeven tijdvak T) „Pointwise Availability” (reparaties toegestaan)	Machinefabriek
4. dat deel van gegeven tijdvak, gedurende hetwelk systeem naar verwachting naar behoren zal functioneren „(Interval) Availability” (reparaties toegestaan)	Radarinstallaties Elektrische centrales Zuiveringsinstallaties

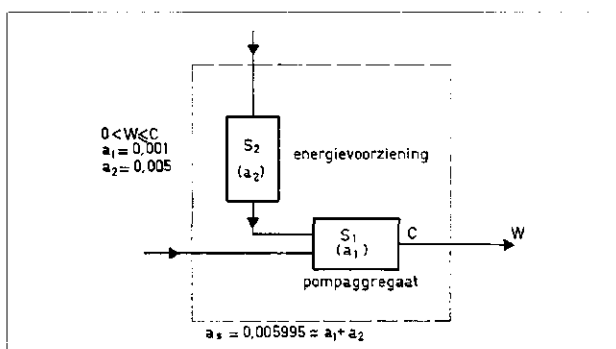
Afb. 8 - Enige definities van bedrijfszekerheid uit de Amerikaanse literatuur.

3. Het begrip bedrijfszekerheid

Bij raadpleging van de literatuur op het gebied van de bedrijfszekerheid blijkt, dat er verschillende omschrijvingen bestaan van het begrip bedrijfszekerheid. Dit verschijnsel is te verklaren op grond van de omstandigheid, dat de omschrijving ten nauwste samenhangt met de aard van het object, waarvan de bedrijfszekerheid wordt onderzocht. Soms is in het geheel geen mogelijkheid tot reparatie aanwezig (onbemande raketten), soms slechts in beperkte mate (bemande ruimtecapsules), soms bestaat de mogelijkheid van preventief onderhoud (bijvoorbeeld in een machinefabriek), waarbij eventuele storingen slechts leiden tot enig economisch aanvaardbaar geacht productieverlies.

De voornaamste definities van bedrijfszekerheid, welke in de Amerikaanse literatuur werden aangetroffen, zijn in verkorte vorm weergegeven in afb. 8. Bij alle definities is sprake van een kans of mathematische verwachting, welke betrekking heeft op het naar behoren functioneren

Afb. 9 - Voorbeeld 1. Systeem bestaande uit pompaggregaat en energievoorziening.



van het systeem op een bepaald tijdstip in de toekomst.

Bij verdere beschouwing van de gegeven definities blijkt, dat de eerste twee niet in aanmerking komen voor gebruik in de waterleidingtechniek, omdat de mogelijkheid van reparatie wordt uitgesloten. Definities 3) en 4) leveren beide dezelfde numerieke waarden in een concreet geval. Omdat de vierde definitie in waterleidingkringen het meest zal aanspreken, zal deze in het navolgende worden gehanteerd. Op praktische gronden ware voor toepassing in de waterleidingtechniek de duur van het tijdvak, waarop de berekende bedrijfszekerheid betrekking heeft, te stellen op één jaar. Daarmede is de bedrijfszekerheid A als volgt gedefiniëerd:

$$A = \frac{\text{het aantal tijdseenheden binnen een jaar, dat de installatie naar verwachting naar behoren zal functioneren}}{\text{het aantal tijdseenheden van een jaar}}$$

Op overeenkomstige wijze kan de storingskans a worden gedefiniëerd:

$$a = \frac{\text{het aantal tijdseenheden binnen een jaar, dat de installatie naar verwachting niet naar behoren zal functioneren}}{\text{het aantal tijdseenheden van een jaar}}$$

Per definitie is derhalve: $A + a = 1$.

Overeenkomstige definities kunnen worden gegeven voor de bedrijfszekerheid en de storingskans van onderdelen.

Ter aanvulling diene, dat een onderdeel „naar behoren functioneert”, indien het betreffende onderdeel potentiëel in staat is zijn taak naar behoren te vervullen. Een pomp, welke geen defect vertoont, wordt derhalve geacht „naar behoren te functioneren”, zelfs indien door een stagnatie in de energielevering geen water kan worden verpompt.

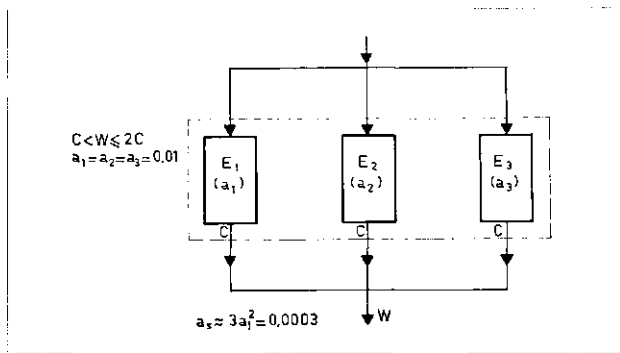
4. Bedrijfszekerheidsberekeningen

In het navolgende is nagegaan, hoe in principe de berekening van de bedrijfszekerheid zou kunnen worden opgezet voor installaties, welke nog in het ontwerp stadium verkeren.

Alleen door sterke schematisering en vereenvoudiging van de reële situatie is het mogelijk met behulp van de grondregels van de waarschijnlijkheidsleer en kansberekening tot een resultaat te komen.

Bij berekeningen en voorspellingen van de bedrijfszekerheid wordt in de eerste plaats als uitgangspunt gekozen, dat van elk onderdeel (component) of samenstel van onderdelen (een eenheid) of samenstel van gelijksoortige eenheden met dezelfde functie een subsysteem) een duidelijke taakomschrijving (met vermelding van kwaliteit en capaciteit) kan worden gegeven. Bovendien wordt doorgaans aangenomen, dat o.m. aan de volgende hypothesen wordt voldaan:

- het optreden van een storing in een of ander onderdeel wordt zuiver door het toeval bepaald;
- storingen van onderdelen zijn „onafhankelijke gebeurtenissen” in de zin, welke daaraan in de waarschijnlijkheidsleer wordt gegeven;
- de storingskans van enig onderdeel gedurende de beschouwde periode van één jaar is constant;



Afd. 10 - Voorbeeld 2. Systeem met 3 eenheden, waarvan 1 reserve.

- d. de invloed van gepland preventief onderhoud op de bedrijfszekerheid is te verwaarlozen;
- e. aan elk onderdeel, eenheid of subsysteem kan een „onafhankelijke” storingskans worden toegekend, op grond van waarnemingen of schattingen.

Met betrekking tot de veronderstellingen d) en e) moet het volgende worden opgemerkt.

Preventief onderhoud wordt veelal uitgevoerd om de kans op storingen op ongelegen ogenblikken zoveel mogelijk te verminderen. Daarom zal de gebruiker het preventief onderhoud zodanig plannen, dat dit buiten de piekuren valt. De beschikbare reserve wordt derhalve tijdelijk kleiner, waardoor de mate van bedrijfszekerheid buiten de piekuren ongunstig wordt beïnvloed; doch tijdens piekverbruiken wordt de bedrijfszekerheid juist vergroot door preventief onderhoud. Daarom is hypothese d) alleen aanvaardbaar, indien de geschatte storingskans van onderdelen, welke preventief onderhoud behoeven, wordt vastgesteld, alsof geen preventief onderhoud plaats vindt.

In navolgende paragrafen is een aantal eenvoudige berekeningsmethoden gegeven, welke bij de analyse van de bedrijfszekerheid van een systeem van belang kunnen zijn. De theorie is toegelicht met een aantal voorbeelden.

5. Systeem met n gelijke eenheden, zonder reserve

De n gelijke eenheden hebben alle een gelijke productiecapaciteit C en een gelijke „onafhankelijke” storingskans a_1 . De verlangde prestatie is de continue levering van W, waarbij $(n - 1) C < W \leq nC$.

Het beschreven systeem zal derhalve alleen zijn taak naar behoren vervullen, wanneer alle n eenheden geen defect vertonen en voor productie beschikbaar zijn.

De kans, dat een eenheid naar behoren functioneert (m.a.w. de bedrijfszekerheid A_1 van een eenheid) is:

$$A_1 = 1 - a_1$$

De bedrijfszekerheid A_s van het systeem (m.a.w. de kans, dat alle n eenheden hun taak naar behoren vervullen) is op grond van de vermenigvuldigingsregel uit de waarschijnlijkheidsleer:

$$A_s = (1 - a_1)^n \quad (1)$$

De storingskans a_s van het systeem is dan:

$$a_s = 1 - (1 - a_1)^n \quad (2)$$

of bij benadering voor kleine waarden van a_1 :

$$a_s \approx na_1 \quad (3)$$

6. Systeem met n ongelijke eenheden, zonder reserve

Formule (1) wordt in de literatuur dikwijls in een meer algemene vorm geschreven:

$$A_s = \prod_{i=1}^{i=n} (1 - a_i) \quad (4)$$

waarin

$$i \in (1, 2, \dots, n)$$

en a_i = onafhankelijke storingskans van de i^{de} eenheid.

De formule geldt, zolang de verlangde prestatie alleen kan worden geleverd, indien alle n eenheden naar behoren functioneren. Derhalve geldt zij ook voor serie-systemen en serieparallelsystemen zonder reserve.

De benaderingsformule voor de storingskans a_s wordt:

$$a_s \approx \sum_{i=1}^{i=n} a_i \quad (5)$$

7. Parallelsysteem met n gelijke eenheden, waarvan één reserve

De n gelijke eenheden hebben alle een gelijk productievermogen C en een gelijke onafhankelijke storingskans a_1 . De verlangde prestatie van het systeem is de continue levering van W, waarbij $(n - 2) C < W \leq (n - 1) C$. Het beschreven systeem zal zijn taak naar behoren vervullen in de volgende toestanden.

1. n eenheden functioneren naar behoren;
2. $(n - 1)$ eenheden functioneren naar behoren.

De kans K_{n-1} op toestand 2 is:

$$K_n = (1 - a_1)^n$$

De kans K_{n-1} op toestand 2 is:

$$K_{n-1} = na_1 (1 - a_1)^{n-1}$$

A_s kan nu worden verkregen door optelling van K_n en K_{n-1} (optelregel uit de waarschijnlijkheidsleer):

$$A_s = (1 - a_1)^n + na_1 (1 - a_1)^{n-1} \quad (6)$$

Bij benadering is voor kleine waarden van a_1 :

$$a_s \approx \frac{1}{2} n (n - 1) a_1^2 \quad (7)$$

8. Parallelsysteem met n gelijke eenheden, waarvan r reserve

Formules (6) en (7) zijn bijzondere gevallen van het meer algemene geval, waarin het systeem bestaat uit n gelijke eenheden, waarvan r eenheden als reserve staan opgesteld. Elke eenheid heeft wederom een productievermogen C en een onafhankelijke storingskans a_1 .

De verlangde prestatie W voldoet aan $(n - r - 1) C < W \leq (n - r) C$.

De algemene formule wordt dan:

$$A_s = \sum_{i=0}^{i=r} \frac{n!}{(n - i)! i!} a_1^i \quad (8)$$

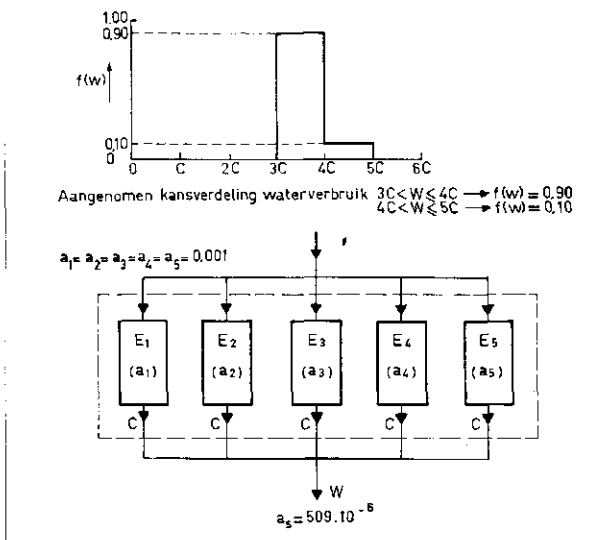
Voor kleine waarden van a_1 wordt de benaderingsformule voor de storingskans a_s van het systeem:

$$a_s \approx \frac{n!}{(n - r - 1)! (r + 1)!} a_1^{r+1} \quad (9)$$

waarin

$$n! = n (n - 1) (n - 2) \dots \times 1$$

en per definitie: $0! = 1$.



Afb. 11 - Voorbeeld 3. Systeem met 5 eenheden, waarvan 1 reserve gedurende 10 % van de tijd.

Door substitutie van $r = 0$ en $r = 1$ in formule (9) worden respectievelijk formules (3) en (7) teruggevonden.

9. Voorbeelden en toepassingen van voorgaande theorie
 Voorbeeld 1 (afb. 9)

Gevraagd te berekenen de bedrijfszekerheid A_s en de storingskans a_s van een systeem (met productiecapaciteit C), dat bestaat uit twee ongelijke subsystemen S_1 en S_2 (bijvoorbeeld een pompaggregaat en zijn energievoorziening) met onafhankelijke storingskansen $a_1 = 0,001$, resp. $a_2 = 0,005$. De gevraagde prestatie W kan alleen worden geleverd, indien beide subsystemen hun taak naar behoren vervullen. Voorts is steeds $0 < W < C$.

Oplissing:

Het betreft hier een serie-systeem.

Formule (4) geeft de gevraagde uitkomst

$$A_s = (1 - a_1) (1 - a_2) = 0,999 \times 0,995 = 0,994005$$

Derhalve:

$$a_s = 1 - A_s = 0,005005$$

Benaderingsformule (5) geeft als resultaat:

$$a_s = a_1 + a_2 = 0,006$$

Voorbeeld 2 (afb. 10)

Gevraagd te berekenen de bedrijfszekerheid A_s en de storingskans a_s van een systeem (met totale productiecapaciteit $3C$), dat bestaat uit 3 gelijke eenheden E_1 , E_2 en E_3 , elk met een capaciteit C en met een onafhankelijke storingskans $a_1 = 0,01$. De gevraagde prestatie W kan alleen worden geleverd, indien tenminste 2 van de 3 eenheden naar behoren functioneren. Voorts is steeds: $C < W \leq 2C$.

Oplissing:

Het betreft hier een parallel-systeem.

Pas formules (6) en (7) toe met $n = 3$ of formules (8) en (9) met $n = 3$ en $r = 1$.

We vinden:

$$A_s = 0,99^3 + 3 \cdot 0,01 (0,99)^2 = 0,999702$$

Derhalve:

$$a_s = 1 - A_s = 0,000298.$$

Met de benaderingsformule hadden we gevonden:

$$a_s = \frac{1}{2} \times 3 \times 2 \times (0,01)^2 = 0,0003.$$

Voorbeeld 3 (afb. 11)

Gevraagd te berekenen de bedrijfszekerheid A_s en de storingskans a_s van een systeem, bestaande uit 5 pompaggregaten (elk met een capaciteit C) met onafhankelijke storingskansen $a_1 = 0,001$.

De gevraagde prestatie W voldoet gedurende 10 % van de tijd aan $4C < W \leq 5C$ en gedurende 90 % van de tijd aan $3C < W \leq 4C$.

Oplissing:

Het betreft hier een parallel-systeem.

Gedurende 10 % van de tijd geldt:

$$a_{s5} = 0,005 \text{ (formule 3)}$$

$$\text{derhalve } A_{s5} = 0,995$$

Gedurende 90 % van de tijd geldt

$$a_{s4} = 10^{-5} \text{ (formule 7)}$$

$$\text{derhalve } A_{s4} = 0,99999$$

De bedrijfszekerheid A_s van het systeem onder de vigerende omstandigheden kan worden berekend met behulp van de produkt- en optelregel uit de waarschijnlijkheidsleer:

$$A_s = 0,10 A_{s5} + 0,90 A_{s4}$$

derhalve

$$A_s = 0,999491 \text{ en}$$

$$a_s = 509 \times 10^{-6}$$

Voorbeeld 4 (afb. 12)

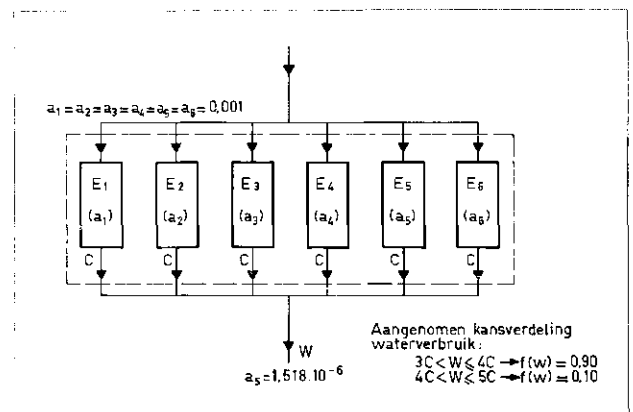
Door toevoeging van één extra-eenheid aan het systeem van voorbeeld 3 wordt de bedrijfszekerheid van het systeem aanmerkelijk bevorderd.

In dit geval is $n = 6$ en wordt volgens formule (9):

$$a_{s5} = 15 \cdot 10^{-6}$$

$$\text{en } a_{s4} = 2 \cdot 10^{-8}$$

Afb. 12 - Voorbeeld 4. Systeem met 6 eenheden, waarvan 2 reserve gedurende 90 % van de tijd en 1 reserve gedurende 10 % van de tijd.



zodat

$$A_s = 0,10 (1 - 15 \cdot 10^{-6}) + 0,90 (1 - 2 \cdot 10^{-8})$$

derhalve

$$A_s = 1 - 5,18 \cdot 10^{-6} \text{ en}$$

$$a_s = 1,518 \cdot 10^{-6}$$

De storingskans van dit systeem is ongeveer 335 maal zo klein als die van het systeem van voorbeeld 3.

10. Serie-parallelsystemen met reserve

Onder een serie-parallelsysteem wordt verstaan een systeem, dat is samengesteld uit een serieschakeling van een aantal subsystemen, welke elk afzonderlijk weer bestaan uit een parallelschakeling van eenheden.

Indien elk subsysteem is samengesteld uit een aantal onderling gelijke eenheden met gelijk vermogen en gelijke storingskans, kan de bedrijfszekerheid worden berekend voor elk individueel subsysteem met behulp van de bekende formules.

Indien bovendien sprake is van een zuivere serieschakeling van subsystemen, waarbij alle subsystemen naar behoren moeten functioneren om het systeem in staat te stellen de gevraagde prestatie te leveren, zal met formule (4) de bedrijfszekerheid van het systeem kunnen worden berekend.

Voorbeeld 5 (afb. 13)

Van het systeem van afb. 13 wordt verlangd, dat continu een capaciteit $4C$ beschikbaar is.

De bedrijfszekerheid A_I van subsysteem S_1 , bestaande uit 3 gelijke eenheden, elk met capaciteit $2C$ en storingskans a_1 , is voor $W = 4C$:

$$A_I = 1 - 3 a_1^2$$

De bedrijfszekerheid A_{II} van subsysteem 2, bestaande uit 5 gelijke eenheden, elk met capaciteit C en gelijke storingskans a_4 , is voor $W = 4C$:

$$A_{II} = 1 - 10 a_4^2$$

zodat de bedrijfszekerheid A_s van het systeem kan worden berekend uit

$$A_s = A_I \cdot A_{II}$$

$$A_s = 1 - 3 a_1^2 - 10 a_4^2 + 30 a_1^2 a_4^2$$

Voor kleine waarden van a_1 en a_4 kan de laatste term gevoegelijk worden verwaarloosd, zodat

$$a_s \approx 3 a_1^2 + 10 a_4^2$$

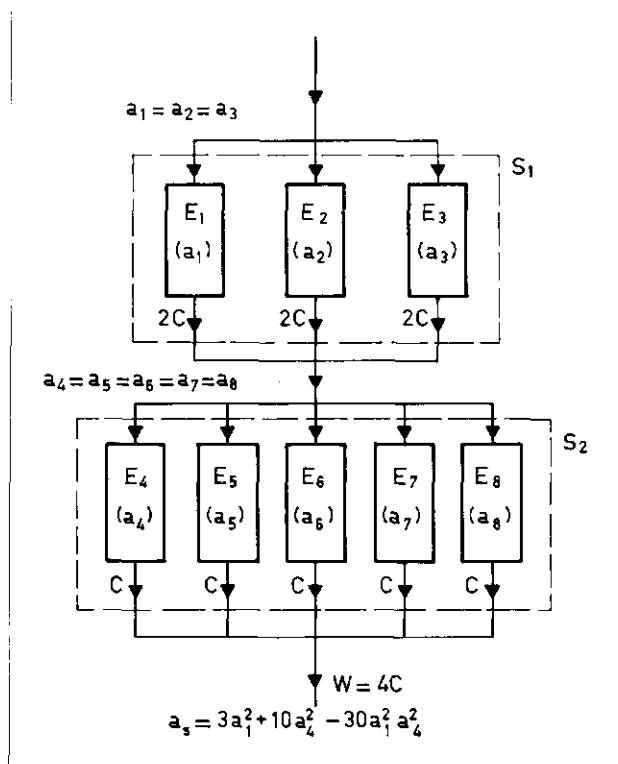
11. Procentuele reserve

Overeenkomstig de gangbare opvatting wordt de procentuele reserve hier gedefinieerd als de verhouding tussen de totale capaciteit van de reserve-eenheden en de totale capaciteit van de overige eenheden.

Voor een systeem, bestaande uit n gelijke eenheden, waarvan r als reserve staan opgesteld, bedraagt derhalve de procentuele reserve R :

$$R = \frac{r}{n - r} \times 100 \%$$

Voor een aantal systemen, elk bestaande uit een aantal gelijke eenheden met gelijke onafhankelijke storingskans $a_1 = 0,01$, zijn met behulp van formule (9) de storings-



Afb. 13 - Voorbeeld 5. Systeem bestaande uit 2 subsystemen.

kansen a_s berekend. Enige resultaten zijn gegeven in tabel I.

Duidelijk blijkt, hoezeer de storingskans van diverse systemen uiteenlopen ondanks een gelijke procentuele reserve. Dikwijls geeft een kleinere procentuele reserve een hogere bedrijfszekerheid. Men zij dus uiterst voorzichtig in het hanteren van de procentuele reserve als maatstaf voor de onderlinge vergelijking van de bedrijfszekerheid van in aanmerking komende alternatieven.

TABEL I - (voor $a_1 = 0,01$)

totaal aantal eenheden n	aantal reserve eenheden r	procentuele reserve R in %	storingskans systeem voor $a_1 = 0,01$ a_s
5	1	25	$1000 \cdot 10^{-6}$
4	1	33	$600 \cdot 10^{-6}$
10	2	25	$120 \cdot 10^{-6}$
8	3	33	$56 \cdot 10^{-6}$
15	3	25	$14 \cdot 10^{-6}$
12	3	33	$4,95 \cdot 10^{-6}$
30	3	20	$0,59 \cdot 10^{-6}$

12. Parallelsystemen van ongelijke eenheden met reserve

Zolang het gaat om systemen en subsystemen bestaande uit gelijke eenheden, is de bedrijfszekerheid op betrekkelijk eenvoudige wijze met behulp van de gegeven formules te berekenen.

Moelijker wordt het berekeningen uit te voeren, indien het systeem niet of niet geheel uit gelijke eenheden bestaat, waarvan bovendien een aantal als reserve is opgesteld. In dergelijke gevallen kan voor niet te grote systemen met succes gebruik worden gemaakt van een „probability tree” („waarschijnlijkheidsnetwerk”). Systematisch wordt nagegaan, in welke toestanden het systeem kan verkeren. De kans op het optreden van elke toestand

TABEL II - (voorbeeld 6)

Toestand	Beschikbaar vermogen m ³ /h	Kans op toestand
1	600	$\Pr \{E_1 E_2 E_3\} = (1 - a_1) (1 - a_2) (1 - a_3)$
2	300	$\Pr \{E_1 E_2 \bar{E}_3\} = (1 - a_1) (1 - a_2) a_3$
3	400	$\Pr \{E_1 E_2 E_3\} = (1 - a_1) a_2 (1 - a_3)$
4	100	$\Pr \{E_1 E_2 E_3\} = (1 - a_1) a_2 a_3$
5	500	$\Pr \{E_1 E_2 E_3\} = a_1 (1 - a_2) (1 - a_3)$
6	200	$\Pr \{E_1 E_2 \bar{E}_3\} = a_1 (1 - a_2) a_3$
7	300	$\Pr \{E_1 \bar{E}_2 E_3\} = a_1 a_2 (1 - a_3)$
8	0	$\Pr \{E_1 E_2 E_3\} = a_1 a_2 a_3$

wordt berekend, waarna de bedrijfszekerheid kan worden berekend door optelling van de kansen op alle toestanden, waarin het systeem de verlangde prestatie nog kan leveren. In het volgende voorbeeld is deze methode toegepast.

Voorbeeld 6 (afb. 14)

Een systeem, bestaande uit 3 eenheden E₁, E₂ en E₃ met gelijke functie, doch met verschillend vermogen (resp. 100, 200 en 300 m³/h) en met storingskansen van resp. a₁, a₂ en a₃ moet continu een debiet leveren van 300 m³/h. Het waarschijnlijkheidsnetwerk van het systeem is weergegeven in de afbeelding. De bij de takken van het netwerk geplaatste symbolen E₁, E₂ en E₃ betekenen, dat E₁, E₂ en E₃ naar behoren functioneren.

De notaties \bar{E}_1 , \bar{E}_2 en \bar{E}_3 hebben betrekking op de toestand, waarin de betreffende eenheden wegens een storing niet beschikbaar zijn voor productie.

De kans op het optreden van toestand 1 (derhalve E₁ E₂ E₃), waarin alle 3 eenheden naar behoren functioneren,

wordt genoteerd als $\Pr \{E_1 E_2 E_3\} \cdot \Pr \{E_1 E_2 E_3\}$

kan berekend worden met de produktregel:

$$\Pr \{E_1 E_2 E_3\} = (1 - a_1) (1 - a_2) (1 - a_3)$$

Op overeenkomstige wijze kunnen de kansen op het optreden van de overige toestanden worden berekend. Voor de onderhavige voorbeeld zijn de resultaten van deze berekening samengevat in tabel II.

Uit de tabel blijkt, dat het systeem alleen naar behoren kan functioneren als het verkeert in één der toestanden 1, 2, 3, 5 of 7. De kans op het optreden van één dezer toestanden, m.a.w. de bedrijfszekerheid A_s van het systeem wordt gevonden door optelling van de kansen op het optreden van deze toestanden. Dit levert:

$$A_s = 1 - a_1 a_3 - a_2 a_3 + a_1 a_2 a_3$$

De storingskans a_s kan worden gevonden door optelling van de kansen op het optreden van de toestanden 4, 6 en 8, waarin het beschikbare vermogen kleiner is dan de gevraagde capaciteit van 300 m³/h. Dit levert:

$$a_s = a_1 a_3 + a_2 a_3 - a_1 a_2 a_3$$

De kans op het optreden van één der toestanden 1 tot en met 8 is 1, want A_s + a_s = 1.

Alternatieve oplossing (zonder netwerk)

Dezelfde uitkomst hadden we gevonden, indien E₁ en E₂ tezamen als een subsysteem S₁ was beschouwd en E₃ als subsysteem S₂.

Het subsysteem S₁ heeft een bedrijfszekerheid A_I voor een capaciteit van 300 m³/h:

$$A_I = (1 - a_1) (1 - a_2)$$

en een storingskans a_I:

$$a_I = a_1 + a_2 - a_1 a_2$$

Het subsysteem S₂ heeft een bedrijfszekerheid A_{II} voor een capaciteit van 300 m³/h:

$$A_{II} = 1 - a_3$$

en een storingskans a_{II}:

$$a_{II} = a_3$$

Het systeem kan alleen zijn taak niet vervullen, indien beide subsystemen S₁ en S₂ zijn gestoord, derhalve is de storingskans a_s van het systeem

$$a_s = \Pr \{S_1 S_2\} = a_I a_{II}$$

$$a_s = a_1 a_3 + a_2 a_3 - a_1 a_2 a_3$$

en

$$A_s = 1 - a_1 a_3 - a_2 a_3 + a_1 a_2 a_3$$

Opmerkingen

Toepassing van deze „netwerkmethode” lijkt op het eerste gezicht ook aantrekkelijk voor de berekening van meer ingewikkelde systemen. Hieraan zijn evenwel grote praktische bezwaren verbonden. Het voornaamste bezwaar is, dat het aantal toestanden in het netwerk exponentieel toeneemt met het aantal eenheden. Voor een systeem met 10 eenheden, bedraagt het aantal toestanden reeds 2¹⁰ = 1024, voor een systeem met 33 eenheden ca. 10 miljard!

Een ander bezwaar is, dat ondanks een systematische aanpak de kans op vergissingen en rekenfouten vrij groot is. Het verbruik van een computer kan vooral het eerste bezwaar niet ondervangen, omdat het aantal gegevens, dat moet worden ingevoerd zeer groot is, en deze een aanzienlijke voorbewerking moeten ondergaan.

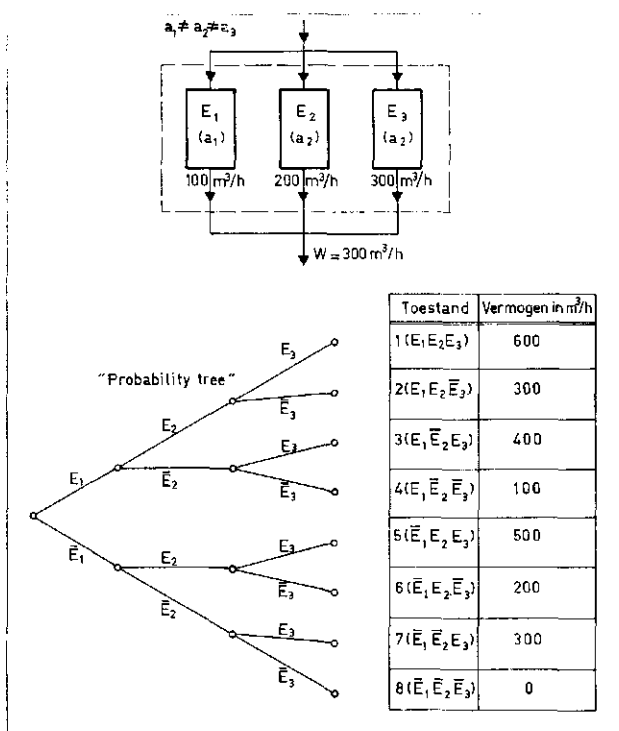
Aan beide bezwaren kan gedeeltelijk worden tegemoet gekomen door gebruik te maken van de hierna te beschrijven „matrix-methode”.

13. Matrix-methode

Bij de „matrix-methode” voor de berekening van de bedrijfszekerheid worden de kansen op toestanden, welke optreden ten gevolge van meer dan 2 gelijktijdig optredende defecten aan verschillende onderdelen van de installatie, verwaarloosd. De invloed van de verwaarlozing van deze kansen op de uitkomsten zal later worden besproken.

De ontwikkelde methode heeft het voordeel, dat zij niet alleen een systematische aanpak bevordert, doch ook, dat computerberekeningen van verschillende ontwerpen met behulp van hetzelfde computerprogramma kunnen worden uitgevoerd.

De werkwijze, welke bij de matrix-methode wordt gevolgd, kan het beste worden beschreven aan de hand van



Afb. 14 - Voorbeeld 6. Systeem met 3 ongelijke eenheden.

een tweetal voorbeelden, welke reeds in het voorgaande met de conventionele methode werden doorgerekend.

Voorbeeld 7

Zie voor de gegevens: voorbeeld 6 en afb. 14.

De matrix is in dit geval

Kolom	1	2	3	4	5	6
	Component of eenheid	Storingskans	Toestand bij één defect	Toestand bij combinatie van twee defecten		
rij				E_1	E_2	E_3
1	E 1	a_1	500	—	—	—
2	E 2	a_2	400	300	—	—
3	E 3	a_3	300	200	100	—

In kolom 1 is de codering van de betreffende component aangegeven. Kolom 2 geeft de bij het betreffende onderdeel behorende onafhankelijke storingskans. In kolom 3 is de beschikbare capaciteit van het systeem aangegeven in het geval van een defect van de in de betreffende rij in kolom 1 vermelde eenheid. In de kolommen 4 tot en met 6 is hetzelfde geschied, doch thans voor combinaties van defecten aan 2 componenten.

In kolom 5, rij 3 betekent 100 derhalve, dat het systeem bij gelijktijdig optredende defecten van E 2 en E 3 slechts 100 m³/h kan leveren.

Wordt zoals in het onderhavige geval, een minimale prestatie gevraagd van 300 m³/h, dan moeten voor de berekening van de bedrijfszekerheid van het systeem alleen die toestanden in aanmerking worden genomen, waarin een capaciteit van 300 of hoger staat vermeld.

Door de systematische opstelling van de gegevens, welke in de vorm van de matrix aan de computer worden toegevoerd, is de computer in staat de bedrijfszekerheid van het systeem op snelle en nauwkeurige wijze te berekenen met behulp van een geschikt computerprogramma. Im-

mers aan elke plaats in de matrix kan een kans worden toegekend.

De kans op de toestand van kolom 3, rij 2 is bijvoorbeeld:

$$\Pr \{E_1 E_2 E_3\} = a_2 (1 - a_1) (1 - a_3)$$

en de kans op de toestand van kolom 5, rij 3 is:

$$\Pr \{E_1 \bar{E}_2 E_3\} = a_2 a_3 (1 - a_1)$$

Stelt men $(1 - a_1) (1 - a_2) (1 - a_3) = A_0$, dan is de bedrijfszekerheid A_s van het systeem voor een verlangde prestatie van 300 m³/h te herleiden tot de volgende vorm:

$$A_s = \left[1 + \frac{a_1}{1 - a_1} + \frac{a_2}{1 - a_2} + \frac{a_3}{1 - a_3} + \frac{a_1 a_2}{(1 - a_1) (1 - a_2)} \right] A_0$$

Voorbeeld 8

Zie voor de gegevens voorbeeld 5 en afb. 13.

De matrix wordt:

Component of eenheid	Storingskans	1 defect	2 defecten							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1	a_1	4	—	—	—	—	—	—	—	—
2	a_1	4	2	—	—	—	—	—	—	—
3	a_1	4	2	2	—	—	—	—	—	—
4	a_4	4	4	4	4	—	—	—	—	—
5	a_4	4	4	4	4	3	—	—	—	—
6	a_4	4	4	4	4	3	3	—	—	—
7	a_4	4	4	4	4	3	3	3	—	—
8	a_4	4	4	4	4	3	3	3	3	—

De bedrijfszekerheid A_s van het systeem is voor de continu verlangde prestatie $W = 4C$:

$$A_s = \left[1 + 3 \frac{a_1}{1 - a_1} + 5 \frac{a_2}{1 - a_2} + 15 \frac{a_1 a_2}{(1 - a_1) (1 - a_2)} \right] A_0$$

waarin $A_0 = (1 - a_1)^3 (1 - a_2)^5$

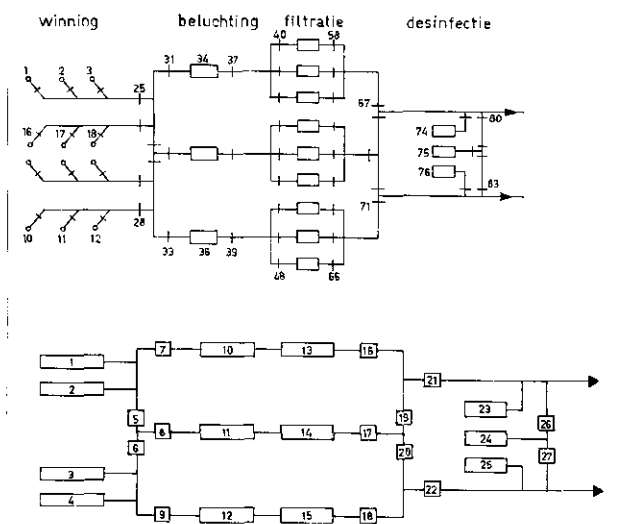
Opmerkingen

De gevonden uitkomsten zijn bijzondere vormen voor de algemene formule, welke bij de matrix-methode wordt toegepast:

$$A_s = \left[1 + \sum_{i=1}^{i=n} \left(F_i \frac{a_i}{1 - a_i} \right) + \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{k=1}^{k=n} \left(F_{ik} \frac{a_i a_k}{(1 - a_i) (1 - a_k)} \right) \right] A_0 \quad (10)$$

waarin:

- n = het aantal componenten, welke bij de berekening in beschouwing wordt genomen;
- i = de i^{de} component van het systeem;
- k = de k^{de} component van het systeem;
- a_i = de storingskans;



Afb. 15 - a. Model bestaande uit 83 componenten; b. Sterk vereenvoudigd model (27 componenten) van oorspronkelijk systeem.

$F_i = 1$, indien een defect aan de i^{de} component geen invloed heeft op het naar behoren functioneren van het systeem (anders $F_i = 0$);

$F_{ik} = 1$, indien een combinatie van defecten van de componenten i en k geen invloed heeft op het naar behoren functioneren van het systeem (anders $F_{ik} = 0$), terwijl $F_{ik} = 0$ voor $k < i$;

$$A_{ij} = \prod_{k=1}^i (1 - a_{ik})$$

Deze algemene formule leent zich uitstekend voor programmering op de computer. Eén moeilijkheid blijft bestaan: het voorbereiden van de gegevens, welke in de matrix moeten worden opgenomen. Dit is voor grotere systemen een omslachtig werk. Voor een systeem, dat uit n componenten bestaat, bevat matrix ongeveer $\frac{1}{2}(n^2 + n)$ elementen. Voor een systeem met bijvoorbeeld

10 componenten is dit geen bezwaar, doch voor een systeem met 50 elementen moeten reeds ca. 1300 gegevens worden voorbereid. Gesteld, dat drie varianten in zulk een geval worden geanalyseerd, dan betekent dit, dat 3900 maal moet worden nagegaan, welke capaciteit nog beschikbaar is, wanneer één of een combinatie van twee storingen van componenten zouden optreden!

Toch levert de matrix-methode ten opzichte van de netwerk-methode reeds een zodanige besparing, dat zij in veel gevallen met succes zal kunnen worden toegepast. De nauwkeurigheid van de matrix-methode is uiteraard kleiner dan die van de netwerk-methode. Verwaarlozing van de kans op het optreden van combinaties van storingen van meer dan twee componenten zal over het algemeen leiden tot een theoretisch te pessimistische schatting van de bedrijfszekerheid.

14. Toepassingsmogelijkheden van de matrix-methode

De matrix-methode kan in principe worden toegepast op elk willekeurig systeem, mits de storingskansen van

de samenstellende componenten bekend worden verondersteld en de opstelling van de matrix uitvoerbaar is. Is dit laatste niet het geval, dan kan dit knelpunt worden omzeild door een verdergaande vereenvoudiging en schematisering. Met opoffering van enige nauwkeurigheid kan dikwijls het samenvoegen van een aantal componenten tot nieuwe eenheden of subsystemen uitkomst brengen. Zo is het mogelijk het systeem van afb. 15a met 83 componenten terug te brengen tot het model van afb. 15b met slechts 27 componenten, zonder al te veel afbreuk te doen aan de nauwkeurigheid van de uitkomst.

Een andere mogelijkheid tot vereenvoudiging is uiteraard alleen die elementen in de matrix op te nemen, welke een relatief grote kans hebben. Alle niet ingevulde elementen verkrijgen dan de waarde 0. Dit betekent, dat een groot aantal combinaties (in veel gevallen het merendeel) van twee defecten niet in beschouwing wordt genomen. Ook hier wordt aan nauwkeurigheid ingeboet. Welke methode men ook kiest, steeds zal blijken, dat degene, die wordt belast met het opstellen van de matrix, aan inzicht zal winnen en tot bepaalde conclusies zal kunnen komen, welke voor de ontwerper van nut kunnen zijn.

Is de matrix eenmaal opgesteld, dan biedt de matrix-methode de mogelijkheid om op zeer eenvoudige en snelle wijze de computer te laten nagaan, welke invloed de storingskansen van bepaalde onderdelen heeft op de bedrijfszekerheid van het onderzochte systeem.

Zulk een onderzoek op gevoeligheid van het systeem voor variaties in de storingskansen van componenten kan tot interessante resultaten leiden, zoals uit de volgende paragraaf zal blijken.

15. Koppelingselementen

Tot dusverre hebben wij steeds verondersteld, dat eenheden van een systeem of subsysteem naar believen kunnen worden bij- en afgeschakeld. De bedrijfszekerheid van de koppelingselementen (afsluiters en afsluitercomplexen, kanalen en leidingen) werd daarbij steeds buiten beschouwing gelaten en niet in de berekening opgenomen, m.a.w. de storingskansen van deze toch zeer essentiële koppelingselementen werd steeds 0 gesteld.

Hoewel op zichzelf de kans op het optreden van een defect in een koppelingselement relatief klein is ten opzichte van de kans op andere storingen, kan zij niet geheel worden verwaarloosd, te meer niet, omdat in veel gevallen de gevolgen van zulk een storing zeer ernstig kunnen zijn en het beschikbare produktievermogen aanzienlijk kan worden gereduceerd.

Vermeerdering van het aantal koppelingselementen betekent meer schakelmogelijkheden en vermindering van de gevolgen van een storing in één of meer eenheden, doch tegelijkertijd wordt de kans op storingen van het systeem door een defect in één der koppelingselementen groter. Er is dus sprake van een optimaliseringsprobleem, dat in principe kan worden opgelost met behulp van een gevoeligheidsonderzoek van de in aanmerking komende varianten.

Aan de hand van afb. 16a zal een en ander worden toegelicht.

Ontwerp A bevat een serieschakeling van 3 deelbewerkingen (bijvoorbeeld: pomp, beluchting, filtratie), waarbij voor elke deelbewerking slechts één eenheid van vol-

doende capaciteit beschikbaar is. Aan elke eenheid is een onafhankelijke storingskans toegekend. Elke storing aan één der eenheden resulteert in een niet kunnen voldoen aan de verlangde prestatie. Voorts is aangenomen, dat de onderlinge verbindingen en de toe- en afvoerlijnen een storingskans 0 hebben. Onderwerp B bevat een parallelschakeling van 3 productielijnen, welke elk zijn opgebouwd uit de 3 deelbewerkingen. Om de verlangde prestatie te leveren, zijn doorgaans slechts 2 productielijnen noodzakelijk. Teneinde één of meer productielijnen te kunnen af- of bijschakelen zijn aan het begin en aan het eind van het systeem afsluitercomplexen (koppelingselementen) nodig, welke een bepaalde storingskans a hebben. Een enkele storing van één der eenheden resulteert slechts in een gedeeltelijk vermogensverlies, terwijl zich gevallen kunnen voordoen, waarin zelfs het tegelijkertijd optreden van 2 storingen nog geen aanleiding tot stagnatie in de levering behoeft te geven (bijvoorbeeld, wanneer deze 2 storingen in dezelfde productielijn voorkomen). Een enkel defect aan één der koppelingselementen houdt evenwel in, dat de installatie niet meer de verlangde prestatie kan leveren.

De ontwerpen C en D bevatten 4 resp. 6 koppelingselementen. De schakelmogelijkheden zijn groter. Het systeem D is zelfs niet gevoelig voor een combinatie van 2 storingen, mits deze niet plaats vinden binnen hetzelfde subsysteem, waartoe gelijksoortige eenheden behoren.

Met het grotere aantal koppelingselementen is de bedrijfszekerheid van het systeem evenwel gevoeliger geworden voor een storing van een koppelingselement.

In de grafiek van afb. 16b zijn de storingskansen van de systemen op logaritmische schaal afgezet als functie van de storingskans a van een koppelingselement.

Voor ontwerp A wordt een rechte lijn gevonden, omdat dit systeem geen koppelingselementen bevat.

Voor de systemen B, C en D worden krommen gevonden, welke voor grote waarden van a asymptotisch naderen tot de lijnen onder 45° C.

voor $0 < a < a_1$ verdient ontwerp D de voorkeur;

voor $a_1 < a < a_2$ verdient ontwerp C de voorkeur;

voor $a_2 < a < a_3$ verdient ontwerp B de voorkeur.

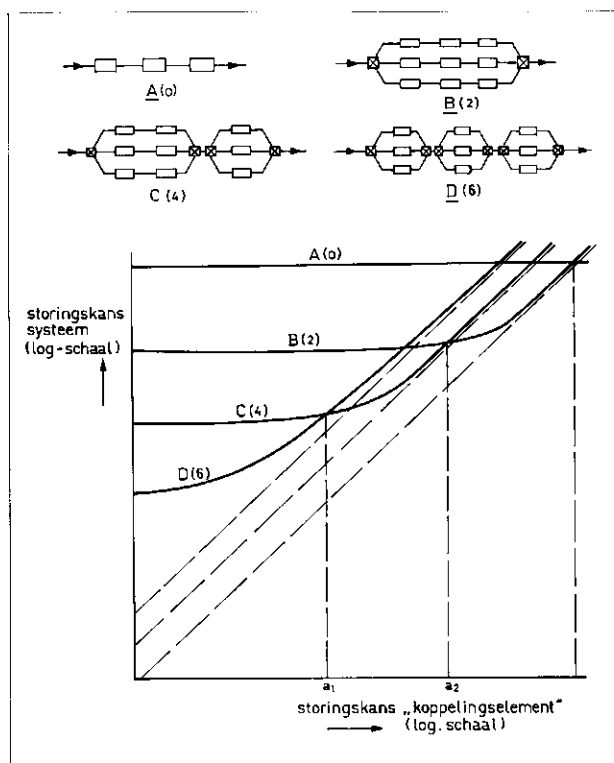
Ontwerp A verdient alleen voor relatief grote waarden ($a > a_3$) de voorkeur.

Terzijde zij opgemerkt, dat de figuur een enigszins vertekend beeld geeft van de door de computer berekende resultaten. Dit is uitsluitend gedaan terwille van de overzichtelijkheid van de grafiek.

Het model, dat met de computer werd geanalyseerd, leverde waarden voor a_1 , a_2 en a_3 welke dichter bij elkaar lagen dan in de grafiek is aangegeven. De algemene tendens, welke uit de grafiek naar voren komt, was evenwel duidelijk aanwezig.

Men dient zich voortdurend te realiseren, dat de plaats en onderlinge groepering van eenheden en koppelingselementen grote invloed kunnen hebben op de bedrijfszekerheid van het ontworpen systeem.

Bij grotere installaties, waar de totale capaciteit meestal gemakkelijk (en zonder veel extra kosten) over meer dan de gebruikelijke twee productielijnen kan worden verdeeld, kan een analyse van de gevoeligheid van het systeem voor de storingskans van de koppelingselementen



Afb. 16 - a. Modellen van de 4 onderzochte systemen; b. Storingskansen van de 4 systemen als functie van de storingskans van een koppelingselement.

een belangrijk hulpmiddel zijn bij de bepaling van het aantal productielijnen en van plaats en aantal van eventuele onderlinge verbindingen, alsmede bij de keuze van het te gebruiken type afsluitorgaan.

16. Reservoirs

Hoewel theoretisch misschien de mogelijkheid bestaat om met behulp van de wachttijden- en voorraadtheorie [2] de invloed van de aanwezigheid van reservoirs op de bedrijfszekerheid quantitatief te benaderen, is schrijver dezes er niet in geslaagd een bruikbare methode te vinden, waarmede in de praktijk kan worden gewerkt.

Het is dan immers noodzakelijk, dat niet alleen de gemiddelde storingskans van de aan de reservoirs voorafgaande fasen kan worden berekend — hetgeen, zoals we hebben gezien, slechts bij grove benadering mogelijk is — doch bovendien, dat de kansverdeling van de duur der individuele storingen ter beschikking staat!

Omdat hieraan in redelijkheid niet kan worden voldaan, wordt hier slechts volstaan met de opmerking, dat het merendeel van alle storingen van korte duur, welke in de eigenlijke productiefase optreden, kan worden overbrugd door een beroep te doen op de aanwezige voorraad gereed produkt, welke in reservoirs is opgeslagen. De bedrijfszekerheid van een productie-installatie wordt dan ook in zeer aanzienlijke mate bevorderd door ruime dimensionering van de reinwaterberging.

17. Theorie en praktijk, conclusies

In het voorgaande is relatief veel aandacht besteed aan een mathematische benadering van het bedrijfszekerheidsvraagstuk. Hier zij nogmaals beklemtoond, dat een dergelijke benadering slechts een beperkte bijdrage kan

leveren. Absolute waarde mag aan de uitkomsten van de mathematische methoden nimmer worden toegekend. Vergelijking van alternatieve oplossingen is in bepaalde gevallen wel mogelijk en zal soms tot aanvaardbare conclusies kunnen leiden. De mathematische bedrijfszekerheidstheorie vergroot voornamelijk het inzicht in de materie. De theorie zou voor gebruik in de praktijk aanmerkelijk in waarde toenemen, wanneer gegevens over de storingskansen van de verschillende componenten beschikbaar zouden zijn. Voorlopig is het nog niet zo ver en zal moeten worden volstaan met schattingen. Veel factoren, zoals weersinvloeden, fluctuaties in de kwaliteit van het ruwe water, bekwaamheid en improvisatievermogen van het bedienend en onderhoudspersoneel zijn evenzeer van invloed op de bedrijfszekerheid, doch lenen zich niet of bijna niet tot wiskundige formulering.

Een andere complicatie is, dat objectieve gequantificeerde criteria voor de bedrijfszekerheid van zuiveringsinstallaties niet beschikbaar zijn.

Indien men de bedrijfszekerheid van een ontwerp analyseert, zal blijken, dat toetsing van het ontwerp aan de volgende punten niet mag ontbreken:

- een ruime hydraulische opzet;
- een flexibele opzet, d.w.z. de mogelijkheid van aanpassing van het systeem aan veranderende omstandigheden;
- een doelmatige onderlinge groepering en rangschikking van onderdelen, eenheden, subsystemen en produktielijnen, waardoor afschakeling van defecte eenheden enz. mogelijk wordt zonder een te groot verlies aan productievermogen; afstemming van deze onderlinge rangschikking op het te verwachten verbruikspatroon;
- oordeelkundige plaatsing en goede bereikbaarheid van de afsluitorganen;
- ruim gedimensioneerde reinwaterberging;
- toepassing van eenvoudige, overzichtelijke en snel te repareren constructies;
- inbouwen van voldoende mogelijkheden tot bekorting van de reparatieduur;
- voldoende reservecapaciteit of snelle uitwisselbaarheid van essentiële onderdelen en eenheden (waterwinningsmiddelen, energievoorziening, pompen, desinfectie- en doseringstoestellen), vooral van die delen van de installatie, welke geen incidentele overbelasting verdragen;
- inbouw van voldoende beveiligingen, signaleringen en storingsmeldingen;
- de mogelijkheid om terstond op handbediening over te gaan in het geval van een storing van de automatisering of afstandsbediening;
- feitelijke of potentiële maatregelen met het oog op bijzondere omstandigheden (oorlog, fall-out, overstromingen e.d.), wanneer aan kwantiteit en aan hygiënische betrouwbaarheid meer waarde wordt gehecht dan aan een mg ijzer meer of minder.

18. Slotopmerking

De aanwezigheid van een redelijke reservecapaciteit kan de exploitant van een installatie dikwijls in de verleiding

bregen een noodzakelijke uitbreiding van de installatie uit te stellen tot een tijdstip, waarop de nominale capaciteit van de installatie reeds ruimschoots is overschreden.

Uiteraard zal elke toeneming van het waterverbruik en elke wijziging in het verbruikspatroon invloed hebben op de bedrijfszekerheid. Een overschrijding van het nominale vermogen met bijvoorbeeld 5 % zal, zoals men gemakkelijk met behulp van de theorie kan nagaan, in veel gevallen de kans op stagnatie van de waterlevering met een factor 100 of meer kunnen vergroten. Dit houdt in, dat de directies van waterleidingbedrijven een zeer grote verantwoordelijkheid hebben bij het vaststellen van het tijdstip, waarop tot uitbreiding van het productievermogen moet worden overgegaan. Faalt men in dit opzicht, dan is de publieke opinie hard en soms zelfs onrechtvaardig. Het grote publiek en de industrie verwachten nu eenmaal van een waterleidingbedrijf, dat bij voortdurend voldoende water van voldoende kwaliteit beschikbaar is.

Gehoopt wordt, dat ook bij het nemen van een beslissing met betrekking tot het tijdstip van uitbreiding of bij de argumentatie daarvan het behandelde in deze voordracht op enigerlei wijze van nut zal kunnen zijn.

Literatuur

1. *Verband tussen filtersnelheid, temperatuur en de daarbij bereikte resultaten van fysisch, chemisch en bacteriologisch onderzoek bij de voorfilters te Leidsin*. Gemeentewaterleidingen Amsterdam, 1967.
2. *Gebruik van moderne statistische methoden*. Zestiende Vacantiecursus in Drinkwatervoorziening, 1964. Technische Hogeschool Delft, Afd. der Weg- en Waterbouwkunde.
3. Barlow, R. E. and Proschan, F., *Mathematical theory of reliability*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1965.
4. Bazovsky, I., *Reliability theory and practice*. Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, Inc., 1961.
5. Gnedenko, B. V., Belyayev, Yu. K. and Solovyev, A. D., *Mathematical methods of reliability theory*. New York, Academic Press, 1969.
6. Howard, W. J., *Chain reliability — a simple failure model for complex mechanisms*. Rand Corp. Res. Memo RM-1058, Mar. 27, 1953.
7. Lloyd, D. K. and Lipow, M., *Reliability: management, methods and mathematics*. Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, Inc., 1962.
8. *Proceedings 1967 Annual Symposium on Reliability*. Washington, D.C., Jan. 10-12, 1967.
9. *Proceedings 1969 Annual Symposium on Reliability*. Chicago, III., Jan. 21-23, 1969.
10. Roberts, N. H., *Mathematical methods in reliability engineering*. New York, McGraw-Hill Book Company, 1964.