

# TOEKOMSTBEELD DER TECHNIEK

serie toekomststudies uit de ingenieurswetenschappen

## Transmissiesystemen voor elektrische energie in Nederland

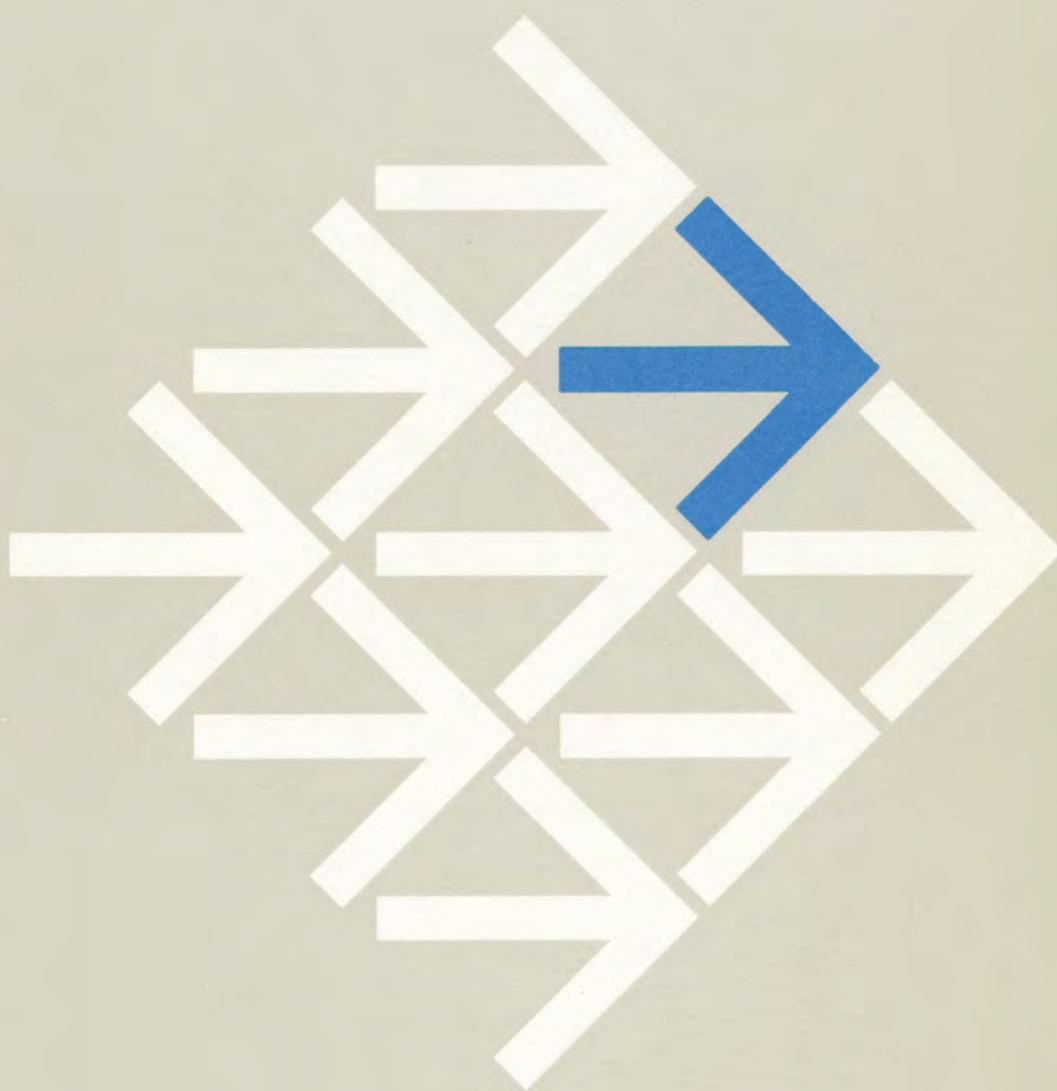
door

Prof. dr. J. J. WENT

Ir. A. GOVERS

Drs. M. Ch. LELIE

Prof. ir. H. WIGGERTS



# TOEKOMSTBEELD DER TECHNIEK

De toekomstige ontwikkelingen der Technische wetenschappen en de rol van de techniek zijn de belangrijkste thema's van de toekomstbeelden van de techniek. Het boek wordt uitgegeven door de Stichting Toekomstbeeld der Techniek, die in 1972 is opgericht. Het boek is een belangrijk document voor de technici van de toekomst. Het wordt uitgegeven door de Stichting Toekomstbeeld der Techniek, die in 1972 is opgericht. Het boek is een belangrijk document voor de technici van de toekomst.

De toekomstige ontwikkelingen der Technische wetenschappen en de rol van de techniek zijn de belangrijkste thema's van de toekomstbeelden van de techniek. Het boek wordt uitgegeven door de Stichting Toekomstbeeld der Techniek, die in 1972 is opgericht. Het boek is een belangrijk document voor de technici van de toekomst.

## Transmissiesystemen voor elektrische energie in Nederland

De toekomstige ontwikkelingen der Technische wetenschappen en de rol van de techniek zijn de belangrijkste thema's van de toekomstbeelden van de techniek. Het boek wordt uitgegeven door de Stichting Toekomstbeeld der Techniek, die in 1972 is opgericht. Het boek is een belangrijk document voor de technici van de toekomst.

Dit boek is een belangrijk document voor de technici van de toekomst. Het wordt uitgegeven door de Stichting Toekomstbeeld der Techniek, die in 1972 is opgericht. Het boek is een belangrijk document voor de technici van de toekomst.

door  
prof. dr. J. J. Went  
ir. A. Govers  
drs. M. Ch. Lelie  
prof. ir. H. Wiggerts

De toekomstige ontwikkelingen der Technische wetenschappen en de rol van de techniek zijn de belangrijkste thema's van de toekomstbeelden van de techniek. Het boek wordt uitgegeven door de Stichting Toekomstbeeld der Techniek, die in 1972 is opgericht. Het boek is een belangrijk document voor de technici van de toekomst.

De toekomstige ontwikkelingen der Technische wetenschappen en de rol van de techniek zijn de belangrijkste thema's van de toekomstbeelden van de techniek. Het boek wordt uitgegeven door de Stichting Toekomstbeeld der Techniek, die in 1972 is opgericht. Het boek is een belangrijk document voor de technici van de toekomst.

De toekomstige ontwikkelingen der Technische wetenschappen en de rol van de techniek zijn de belangrijkste thema's van de toekomstbeelden van de techniek. Het boek wordt uitgegeven door de Stichting Toekomstbeeld der Techniek, die in 1972 is opgericht. Het boek is een belangrijk document voor de technici van de toekomst.

De toekomstige ontwikkelingen der Technische wetenschappen en de rol van de techniek zijn de belangrijkste thema's van de toekomstbeelden van de techniek. Het boek wordt uitgegeven door de Stichting Toekomstbeeld der Techniek, die in 1972 is opgericht. Het boek is een belangrijk document voor de technici van de toekomst.





# TOEKOMSTBEELD DER TECHNIEK

De STICHTING TOEKOMSTBEELD DER TECHNIEK is op 6 februari 1968 opgericht door het Koninklijk Instituut van Ingenieurs met als doelstelling:

het initiëren, begeleiden en ondersteunen van studies die beogen, vanuit verschillende gebieden van de techniek, bij te dragen tot meer integrale visies op de samenleving van de toekomst; voorlichting te geven of mede te werken bij het geven van voorlichting, in het bijzonder aan de Nederlandse samenleving, over de mogelijke toekomstige ontwikkelingen der techniek met het oogmerk hierdoor bij te dragen tot het op harmonische wijze invoegen van die ontwikkeling in de samenleving. De voorlichting, zowel van de Stichting zelf als van de Stichting in samenwerking met andere organisaties, zal geschieden in algemeen toegankelijke wetenschappelijke publikaties.

Een overzicht van reeds verschenen en van binnenkort uit te geven publikaties is gegeven aan de binnenzijde van het achterblad. De publikaties kunnen rechtstreeks bij de Stichting worden besteld.

De Stichting is gevestigd in het gebouw van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs, Prinsessegracht 23, 's-Gravenhage, tel. 070-646800.





## Voorwoord

De Stichting Toekomstbeeld der Techniek tracht die terreinen te verkennen waar de techniek van de toekomst een belangrijke rol zal spelen in de maatschappij van de toekomst. Het was reeds van meet af aan duidelijk dat een der belangrijkste rollen zal zijn toebedeeld aan de energievoorziening. Het energieverbruik is immers een der belangrijkste parameters van wat men zou kunnen noemen de materiële activiteit van de mensheid; het wordt zelfs gebruikt als indicatie van het ontwikkelingsniveau. Reeds als zodanig verdient het alle aandacht, met de nadruk op de facetten van onze moderne wijze van leven waarbij iedereen een beroep doet op een of andere vorm van energie buiten zijn eigen — uiterst beperkte — lichamelijke energie.

Al vroeg in de discussies bleek echter één aspect van dit onderwerp sterk naar voren te komen. Doordat de vraag naar energie zo toegenomen is, en naar zich laat aanzien in de naaste toekomst zo zal blijven toenemen, doen zich problemen voor ten aanzien van de inpassing van de energievoorziening in het maatschappelijke bestel.

Van de gehele energievoorziening is het deel dat ons die energie in de vorm van elektrische stroom ter beschikking stelt de snelst toenemende tak. Dit laat zich verklaren uit het feit dat vrijwel alle functies die van energie worden gevraagd met elektriciteit kunnen worden vervuld; bovendien is het door deze vorm van energie dat lichtvoorziening en de meest diverse communicatiemiddelen tot werkelijke ontwikkeling konden komen.

Het spreekt dan ook vanzelf dat aan de elektriciteitsvoorziening met nadruk aandacht zal worden geschonken. Bij de elektriciteitsvoorziening heeft de gecentraliseerde en economische produktie geleid tot de mogelijkheid dat overal in Nederland elektrische energie in alle gewenste vermogens van enkele watts tot honderden megawatts ter beschikking kan worden gesteld.

Aangezien de plaatskeuze van elektrische centrales steeds meer aan beperkingen onderhevig is, terwijl bovendien het in deze centrales op te stellen vermogen steeds groter zal worden, zijn transmissiesystemen nodig voor het transport van deze grote hoeveelheden elektrische energie naar de stedelijke distributiecentra en naar industrie-complexen. Deze transmissiesystemen fungeren ten dele bovendien als koppelnet, waardoor het mogelijk is bij uitvallen van een opwekeenheden de elektriciteitsvoorziening veilig te stellen.

Hoewel de vraagstukken van produktie, transport en distributie nauw met elkaar verbonden zijn, heeft de Stichting zich in deze publikatie voorlopig beperkt tot het transport. De noodzaak van inpassing in het maatschappelijk bestel zal wellicht tengevolge hebben dat de alom bekende bovengrondse hoogspanningslijnen in de verdere toekomst mogelijk niet meer alleen in aanmerking komen, o.a. wegens de daarvoor benodigde ruimte en de aantasting van het landschap. Het leek daarom gewenst de consequenties te bezien van alternatieve oplossingen, bijv. in de vorm van voor dit doel geschikte ondergrondse systemen. Gelet op de tijd die nodig zal zijn voor ontwikkeling daarvan en de levensduur van transmissiesystemen werden de beschouwingen uitgestrekt over de eerstkomende drie à vier decennia.

Dit werk geeft een overzicht van de toestand in ons land en van de te verwachten toekomstige ontwikkelingen. Het zal tevens dienen als één van de preadviezen voor een op 28 maart 1972 te houden symposium over "Electriciteit in onze toekomstige energievoorziening: mogelijkheden en consequenties..".

Niet alleen aan de auteurs, ir. A. Govers, drs. M. Ch. Lelie, prof. dr. J. J. Went en prof. ir. H. Wiggerts, maar ook aan de overige deelnemers van de werkgroep, ir. P. J. J. Blok, prof. ir. J. J. Broeze, prof. dr. D. Th. J. ter Horst, ir. J. P. Koster, dr. ir. F. H. Kreuger, prof. ir. D. G. H. Latzko, prof. ir. K. J. H. Stigter en ir. J. J. Suyver, is de Stichting veel dank verschuldigd.

ir. L. Schepers, voorzitter.



# Inhoud

<b>Voorwoord</b> door ir. L. Schepers . . . . .	3	A. Algemene beschrijving van de opbouw van een kabel . . . . .	27
<b>Inhoud</b> . . . . .	5	B. Overeenkomst en verschil tussen kabels en bovengrondse lijnen . . . . .	28
<b>Hoofdstuk 1. Noodzaak van de transmissie van elektrische energie</b> door prof. dr. J. J. Went . . . . .	7	C. Factoren die de transportcapaciteit bepalen . . . . .	28
I. Inleiding: Toekomstig elektriciteitsverbruik . . . . .	7	D. Transmissiecapaciteit en capacatieve laadstroom . . . . .	29
II. Transmissie en transmissiecapaciteit . . . . .	10	E. Het waarborgen van de energievoorziening . . . . .	29
III. Waarom is transmissie nodig? . . . . .	10	F. Ontwikkelen van kabels en garnituren . . . . .	29
IV. Hoeveel transmissiecapaciteit is nodig? . . . . .	10	II. Conventionele kabeltypen voor grote vermogens . . . . .	30
V. Kosten van de transmissie in een elektriciteitsverzorgingssysteem . . . . .	12	A. Indeling naar de opbouw van de isolatie . . . . .	30
<b>Hoofdstuk 2. Algemene technische aspecten van de bovengrondse transmissie</b> door ir. A. Govers . . . . .	13	B. Homogene isolatie: polyaetheenkabel . . . . .	30
I. Inleiding . . . . .	13	C. Kabel met gelaagde isolatie: oliedrukkabel . . . . .	30
II. Technische aspecten . . . . .	13	D. Oliedrukkabel met synthetisch isolatiemateriaal . . . . .	31
A. Algemeen . . . . .	13	E. Gekoelde kabels . . . . .	31
B. Constructieve aspecten . . . . .	14	F. Indeling naar de aard der spanning . . . . .	33
C. Electrotechnische aspecten . . . . .	15	G. Gelijkspanningstransmissie . . . . .	33
<b>Hoofdstuk 3. De toekomst van de bovengrondse transmissie</b> door ir. A. Govers . . . . .	21	III. Kabels van de toekomst . . . . .	33
I. Uitgangspunten . . . . .	21	A. Buis kabel . . . . .	33
II. Ontwikkeling van de toekomstige bovengrondse transmissie . . . . .	21	B. Cryogene kabel . . . . .	34
III. Vooruitzichten van de bovengrondse transmissie in Nederland . . . . .	24	C. Diepgekoelde weerstandskabel . . . . .	34
Literatuurverwijzing . . . . .	26	D. Suprageleidende kabels . . . . .	35
<b>Hoofdstuk 4. Ondergrondse transmissiesystemen, nu en in de toekomst</b> door drs. M. C. Lelie . . . . .	27	E. Microgolfpijp . . . . .	36
I. Enkele technische aspecten van de ondergrondse transmissie . . . . .	27	Literatuurverwijzing . . . . .	36
		<b>Hoofdstuk 5. Planologische aspecten</b> door prof. ir. H. Wiggerts . . . . .	37
		I. Inleiding . . . . .	37
		II. Micro-planologische aspecten van bovengrondse transmissiesystemen . . . . .	38
		III. Planologische aspecten op het meso- en macroniveau . . . . .	40
		IV. Enkele opmerkingen ter afsluiting . . . . .	41



# Hoofdstuk 1. Noodzaak van de transmissie van elektrische energie

door prof. dr. J. J. Went

## Summary

*For a number of reasons electrical energy will take account for a growing part of total energy consumption. Considering civil-engineering and economic limitations the total power, installed in one future electric power station, will probably not exceed 4,000 . . . 5,000 MW. In connection with that the maximum unit size will be approximately 1000 MW. Consequently the number of power units and of power plant sites will rise.*

*Transmission, being high voltage transportation of large quantities of energy, is needed when the places of consumption and the places of production do not coincide geographically, which will increasingly occur.*

*The interlocking of power stations is further needed both in order to reduce reserve generating power and for the transportation of electricity on account of economic reasons.*

*The needed transmission capacity is determined by both the capacity of the largest generating unit and the capacity needed for economic transports. The transport capacity of the recently built 380 kV power grid (1500 MVA per circuit) will probably be sufficient for the firstcoming decades.*

*However, the construction of more circuits, or circuits of higher voltage, could be needed in the future for continuous transport of electricity to areas where shortage of cooling water is to be expected.*

*The relative costs of investment are given for present-day overhead and underground transmission systems. Underground, transmission systems, being very costly, should only be used for short tracks at places where this is needed for reasons of physical planning.*

## I. Inleiding: Toekomstig elektriciteitsverbruik

Elektrische energie is een energievorm die niet alleen zeer veelzijdig is in zijn toepassingsmogelijkheden zoals op de gebieden van verlichting, kracht, warmte en telecommunicatie, maar die op verschillende van deze gebieden — bijv. verlichting en telecommunicatie — zelfs een monopolie bezit.

Aangezien daarenboven elektrische energie een energievorm is die, waar hij wordt toegepast, volkomen schoon is en dus het milieu niet aantast, moet verwacht worden dat elektrische energie een steeds grotere fractie van het totale energieverbruik voor haar rekening zal gaan nemen. Volledigheidshalve moet hierbij wel worden opgemerkt dat de opwekking van elektriciteit wel een milieu-aantasting kan veroorzaken. Bij het gebruik van fossiele brandstoffen zal deze aantasting zich als luchtverontreiniging<sup>1)</sup> ten gevolge van schadelijke verbrandingsprodukten en als waterverwarming<sup>1)</sup> via koelwater voor de condensor manifesteren.

Het eerste effect, de luchtverontreiniging, zal praktisch kunnen worden opgelost door van fossiele grondstoffen op kernenergie-grondstoffen over te gaan, aangezien de hoeveelheid afvalprodukten dan met een factor  $10^7$  vermindert, mitsdien valt op te slaan en te controleren.

De waterverwarming levert zowel bij fossiele grondstoffen als bij kernenergie-grondstoffen een probleem

op. Het verwarmingseffect zal bij te hoge temperaturen schadelijke gevolgen veroorzaken voor het biologische leven in het water; bij lage temperaturen kan het — dankzij het stimuleren van dat biologische leven — daarentegen ook wel eens een gunstig effect hebben. De centrale-complexen, waarin de elektriciteit wordt opgewekt, kunnen bovendien landschappelijk storend werken. Bij het gebruik van waterkracht (die overigens in Nederland nauwelijks voorkomt) vindt geen milieu-aantasting plaats in de hiervoor genoemde zin, maar kan evenzeer aantasting van het landschap plaatsvinden.

Op het ogenblik wordt in Nederland ca. 18 % van het totale fossiele energieverbruik omgezet in elektrische energie. Aangezien de efficiency van deze omzetting ca. 30 . . . 40 % bedraagt, hangt het af van de specifieke toepassing of de tussenstap elektriciteit tussen fossiele brandstof en gebruiker tot een groter of kleiner primair energieverbruik zal leiden. Voor kracht-opwekking bijv. zal veelal de tussenstap energetisch voordelig zijn, voor ruimteverwarming niet.

Hoewel de transmissiekosten geenszins zijn te verwaarlozen (zie paragraaf V), kan men in het kader van deze algemene inleiding de transmissieverliezen nog wel buiten beschouwing laten.

Wanneer men van fossiele brandstoffen over wil of over moet gaan op kernenergie-brandstoffen wordt ook voor de ruimteverwarming dit beeld geheel anders. Het opwekken van warmte d.m.v. kernenergie is op kleine schaal veelal te oneconomisch; het opwekken op grote schaal zal bij het directe gebruik als warmte veelal zeer grote warmtetransporten over grotere afstanden noodzakelijk maken. Daaraan zijn zowel zeer hoge kosten als grote warmteverliezen verbonden; de

<sup>1)</sup> Electrical energy needs and environmental problems, now and in the future, publicatie nr. 7, Stichting Toekomstbeeld der Techniek, 's-Gravenhage, 1971.



tussenstap van elektriciteit kan onder die omstandigheden dus een betere oplossing bieden. Direct industrieel warmtegebruik kan zo groot zijn dat het wel eens zinvol is in combinatie met een centrale-complex; toch moet men zich realiseren dat voor grote centrale-complexen op die wijze in het algemeen slechts een kleine fractie van de afvalwarmte een zinvolle toepassing kan vinden.

De nog wel eens gepropageerde stadsverwarming d.m.v. een gecombineerd warmte-krachtbedrijf dient met de nodige scepsis te worden bekeken:

Ten eerste zal men in de toekomst — juist uit milieu-overwegingen — niet al te gemakkelijk besluiten tot de bouw van een centrale-complex in — of aan de rand van — een grotere stad terwille van niet te grote transportkosten en transportverliezen.

Ten tweede worden voor stadsverwarming veel hogere temperaturen verlangd dan de 35...40° C in de condensoren van de stoomturbines. Bij veel hogere temperaturen gaat de efficiency van het energiesysteem sterk achteruit (ca. 1% / °C), terwijl het — althans vooralsnog — ook nog bezwaarlijk is dat de piekbelastingen van het elektriciteitsverbruik en van het warmteverbruik vrijwel samenvallen en de jaarbelasting van het warmteverbruik klein is (in de zomer gedurende een aantal maanden zelfs praktisch nul).

In overeenstemming met de hiervoor genoemde argumenten behoeft het dan ook geen verbazing te wekken dat, waar het totale energieverbruik in het algemeen met 3...5% per jaar stijgt, het elektriciteitsverbruik sneller toeneemt en wel met 6...10% per jaar: elektriciteit neemt een groeiend percentage van het energieverbruik voor haar rekening.

In afb. 1 zijn verschillende groeipercentages van de elektriciteitsvoorziening nader aangegeven. De twee middelste getrokken lijnen, die het opgestelde elek-

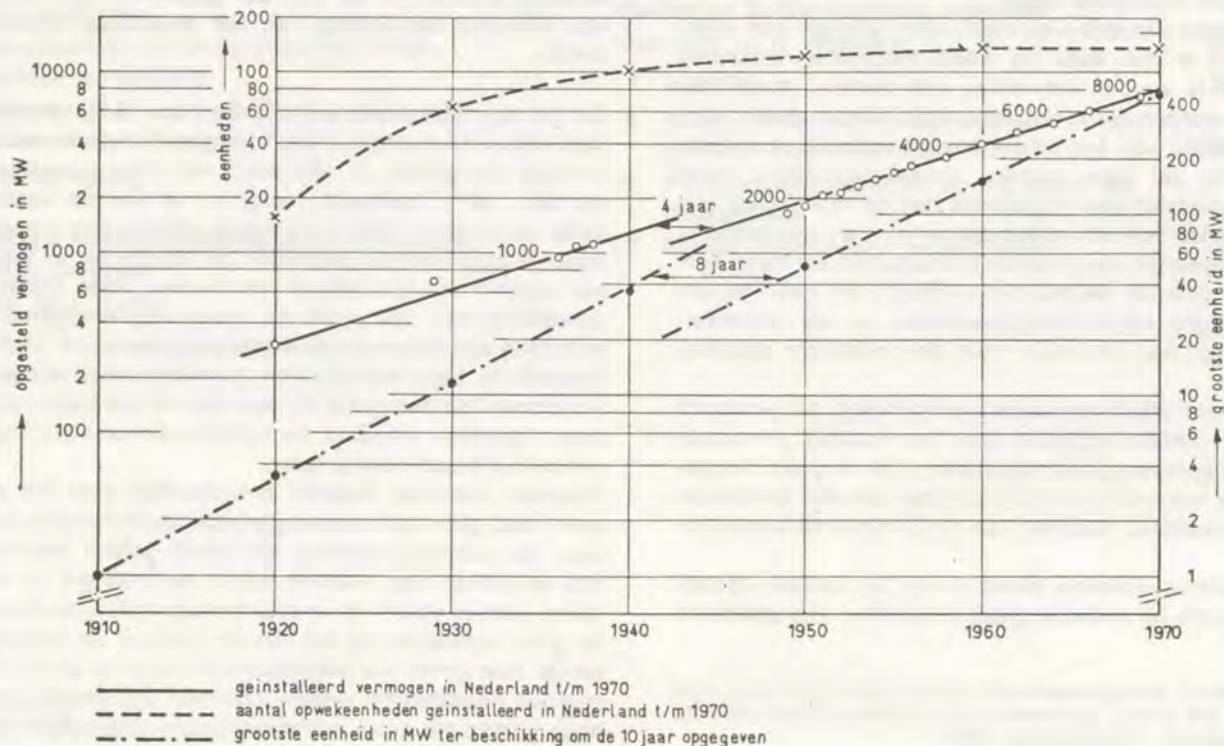
trische vermogen in MW (schaal links) in Nederland aangeven, kunnen voor en na de oorlog worden beschreven door evenwijdige lijnen die nauwkeurig overeenkomen met een verdubbelingstijd van het elektriciteitsvermogen in 10 jaar, d.w.z. met een groeipercentage van ruim 7% per jaar. Interessant hierbij is de invloed van de oorlogsjaren, die gerepresenteerd kan worden met een (niet ingehaalde) vertraging van 4 jaar. Hoelang deze groei nog zal doorgaan is moeilijk te voorspellen, maar wel moet men er rekening mee houden dat — bijv. door de introductie van niet-luchtvervuilende kernenergie, door het weren van fossiele brandstoffen voor lokaal gebruik in dichtbevolkte streken (zoals grote steden) en het op den duur schaars worden van fossiele brandstoffen — een extra stimulans wordt gegeven aan een verdergaande elektrificatie. In verband met de hier geconstateerde trend wordt ook bij een matig stijgen van de energieproductie toch voorlopig nog een sterk stijgen van het elektriciteitsverbruik verwacht.

Indien men de in afb. 1 gegeven stijging van het geïnstalleerd vermogen zou extrapoleren — en daarmee een voortgaande verdubbeling in tien jaar zou veronderstellen — dan zouden volgende geïnstalleerde vermogens benodigd zijn:

in het jaar 1970 (uitgangspunt: zie afb. 1)	8.000 MW;
in het jaar 1980	15.000 MW;
in het jaar 1990	30.000 MW;
in het jaar 2000	60.000 MW.

Gezien het huidige niveau van het verbruik per hoofd van de bevolking in Nederland, vergeleken met dat van andere geïndustrialiseerde landen, is het gewettigd te veronderstellen dat de trend van de afgelopen decennia nog wel tot het eind van deze eeuw zal kunnen doorlopen.

afb. 1 - Groei van de elektriciteitsvoorziening.





De twee onderste streep-punt lijnen in afb. 1 geven de groei van de grootte der opwekeenheden in de loop der jaren aan; hierbij is vanaf 1910 steeds om de 10 jaar de grootste eenheid waarover in dat jaar werd beschikt aangegeven. Uit het verloop der weer evenwijdige lijnen, dat aanzienlijk steiler is dan de lijnen van het elektriciteitsproductievermogen, blijkt meteen dat deze groei naar grotere opwekeenheden uit economische overwegingen aanzienlijk sneller verloopt dan die van het elektriciteitsverbruik. De verdubbeling vindt niet plaats in ca. 10 jaar, maar in ca. 5 jaar, wat overeenkomt met een gemiddelde groei van 15 % per jaar.

De oorlogsjaren geven hier echter merkwaardigerwijze een langere stagnatie van 8 jaar te zien.

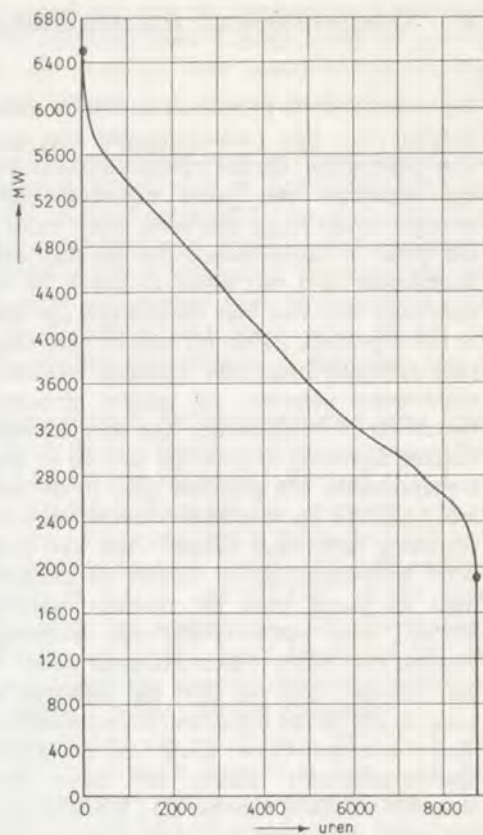
Als gevolg hiervan is — zoals eveneens aangegeven in afb. 1 (bovenste stippellijn) — het aantal opwekeenheden na een eerste sterke toename tussen 1920 en 1950 (20...120 eenheden) praktisch niet meer verder aangegroeid.

Hoezeer men voor de toename van het elektriciteitsverbruik voorlopig dus wel een voortgaande expansieve groei moet verwachten, is dat voor de eenheids-grootte der opwekeenheden waarschijnlijk niet het geval. Enerzijds zal men op één centrale-complex (mede in verband met onderhoudswerkzaamheden en eventuele uitval van eenheden) zeker streven naar een aantal van ten minste 3 tot 5 opwekeenheden. Anderzijds stelt de noodzakelijke hoeveelheid koelwater, die op één plek ter beschikking kan worden verkregen zonder zeer kostbare civiele werken te moeten uitvoeren, zodanige begrenzungen aan de omvang van een centrale-complex dat deze op economische en civiel-technische gronden wel beperkt zal blijven tot een op te stellen vermogen van 4 tot 5000 MW.

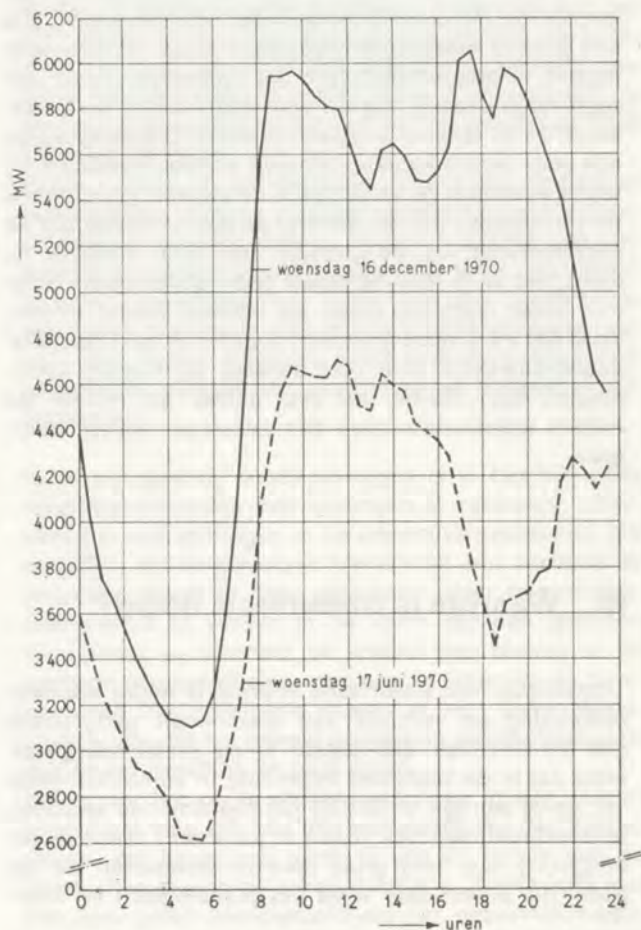
Deze twee factoren samen maken het onwaarschijnlijk dat opwekeenheden, veel groter dan ca. 1000 MW, in de toekomst zullen worden toegepast. Dit argument wordt nog versterkt door het feit dat wellicht de kapitaalslasten per MW boven 1000 MW niet meer zo sterk zullen dalen, terwijl een uitval van zo'n eenheid bedrijfstechnisch erg duur wordt. Het gevolg hiervan zou kunnen zijn dat in de toekomst zowel het aantal eenheden als het aantal centraleterreinen weer zal gaan toenemen.

Ten slotte moet er hierbij op worden gewezen dat het waarschijnlijk moet worden geacht dat er naast grote opwekeenheden ook plaats zal zijn voor een aantal kleinere gasturbines van bijv. 50 MW vermogen, die goed voor piekbelasting kunnen worden gebruikt<sup>1)</sup> (afb. 2 en 3). Uit de hier genoemde studie zou zelfs kunnen volgen dat op den duur 10...25 % van het totale opgestelde vermogen zal bestaan uit betrekkelijk kleine gasturbines; het percentage van de daarmee op te wekken kW.h's zal echter wel gering zijn.

<sup>1)</sup> R. J. Clason, F. Rienstra and W. K. Wiechers: The integration of nuclear power in an electricity production system with an interconnecting transmission network, presented at the Fourth International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 6-16 September 1971.



afb. 2 - Jaarbelasting - duur - kromme voor Nederland in 1970.



afb.3 - Dagbelastingskromme van Nederland op een zomer- en een winterdag in 1970.



## II. Transmissie en transmissiecapaciteit

De voorafgaande gegevens en beschouwingen zijn van belang voor een toekomstbeeld van de transmissie van elektriciteit. Onder transmissie wordt dan verstaan het transport van grote hoeveelheden elektrische energie onder hoge spanning (bijv. meer dan 100 kV). Dit staat in tegenstelling tot de distributie, die zich bezighoudt met het meer in detail en onder lagere spanning verdelen van de energie aan de gebruikers. In het algemeen zullen bij hogere spanningen ook grotere energietransporten mogelijk zijn door eenzelfde elektrische geleider: bij gelijke stroomsterkte door eenzelfde stroomgeleider kan men bij een bijv.  $10 \times$  hogere spanning in principe ook  $10 \times$  zoveel energie transporteren. Dit principe gaat in de praktijk helaas niet helemaal op, niet zozeer omdat men bij een hogere spanning zorg moet dragen voor een grotere elektrische isolatieweerstand tussen de geleiders, dan wel naar de aarde (met de daaraan verbonden hogere kosten), maar vooral omdat men rekening zal moeten houden met extra elektriciteitsverliezen. In het geval van kabels<sup>1)</sup> zijn dat bijv. de verliezen in de kabelisolatie, die in het algemeen kwadratisch met de spanning toenemen; in het geval van bovengrondse hoogspanningslijnen<sup>2)</sup> zullen dit bijv. sproeiverliezen (coronaverliezen) kunnen zijn, die afhankelijk zijn van het weer en vooral bij zeer hoge spanningen (bijv. 1500 kV) zullen optreden.

Daarenboven zal men zich moeten realiseren dat de elektrische isolatie van kabels ook tegelijkertijd een thermische isolatie blijkt te zijn; dit heeft tot consequentie dat de elektrische geleider warmer wordt, dus een grotere elektrische weerstand krijgt en dus weer hogere weerstandsverliezen zal opleveren. Zoals gezegd moet daarbij nog de warmteproductie door verliezen in de isolatie worden opgeteld. Dientengevolge kan voor iedere kabelconstructie worden berekend bij welke spanning de verliezen in de isolatie (en dus ook de verwarming van de isolatie) zo groot worden dat de warmteafvoer van de geleider niet meer mogelijk is; d.w.z. dat er in feite helemaal geen elektriciteitstransport meer door die kabel zal kunnen plaats vinden. Voor 380 kV is deze grenswaarde ook bij de 'klassieke' papier-olie-kabel nog niet bereikt; bij hogere spanningen, bijv. 750 kV, zal men echter ten minste tot andere isolatiematerialen dan cellulose moeten overgaan.

## III. Waarom is transmissie nodig?

Transmissie van elektrische energie is nodig wanneer opwekking en verbruik van elektriciteit geografisch niet samenvallen. Dit laatste is nu reeds het geval, maar zal in de toekomst zeker nog in versterkte mate het geval worden omdat bij het toenemende elektriciteitsverbruik men ook (zoals in paragraaf I reeds is uiteengezet) naar zeer grote centrale-complexen toe zal gaan, die alleen daar waar dat planologisch en koel-

technisch mogelijk is zullen kunnen bestaan.

Transmissievermogen is ook nodig om de grote centrale-complexen onderling te verbinden, zodat het mogelijk is, de zgn. 'draaiende reserve' te beperken: dat is reservevermogen dat het mogelijk maakt — bijv. in geval van storing in een centrale — de toch nodige energie zeer snel van elders te betrekken. Daarvoor moet steeds nog vrije transmissiecapaciteit ter beschikking staan.

Ten derde is er ook nog transmissievermogen nodig om de in opweksystemen noodzakelijke reserve (bijv. voor onderhoud en reparatie van opwekeenheden) gemeenschappelijk en niet per centrale ter beschikking behoeven te hebben. Zou nl. iedere centrale voor haar eigen reserve-productievermogen moeten zorgen, dan zou zeker een veel grotere reserve voor het geheel nodig zijn dan indien men deze reserve gemeenschappelijk aanhoudt.

Ten slotte is er nog een tweetal redenen waarom eveneens een koppeling van centrales via een transmissiesysteem nodig is:

In de eerste plaats zal bij het gebruik van grote eenheden uiteraard niet jaarlijks een uitbreiding van alle centrales plaatsvinden; het totale aantal nieuwe grote eenheden dat in een land als Nederland op het ogenblik per jaar gebouwd moet worden, bedraagt nl. slechts 1 à 2. Om ook hierdoor geen overbodige reserve te kweken zal men tijdelijk in een zeker aantal centrales overschotten moeten accepteren, terwijl in andere centrales overeenkomstige tekorten aanwezig zullen moeten zijn. Voor het transport van deze overschotten en tekorten moet uiteraard transmissiecapaciteit worden gebruikt.

In de tweede plaats zal men uiteraard streven naar wat wordt genoemd een meest economische lastenverdeling; d.w.z., dat voor de verbruikspunten van de elektriciteit de som van opwekkings- en transmissiekosten minimaal moet zijn. Ook om deze reden zal men bijv. gedurende piekbelastingen veelal niet via het starten van buiten bedrijf staande opwekeenheden voor de piektijd alleen, maar via het transmissiesysteem en het vergroten van de 'output' van in bedrijf zijnde machines aan de vraag trachten te voldoen.

De consequentie van deze beschouwing is dat alle centrale-complexen aan het transmissiesysteem zullen moeten zijn gekoppeld.

## IV. Hoeveel transmissiecapaciteit is nodig?

De transmissiecapaciteit zal, zoals hiervóór is uiteengezet, twee functies moeten vervullen:

Ten eerste moet het hoogspanningsnet als reserve ter beschikking staan voor storingen. Zou een storing in één van de grote opwekeenheden bij grote belasting optreden, dan wil dat zeggen dat minstens een transmissiecapaciteit vrij ter beschikking moet staan, gelijk aan het vermogen van de grootste opwekeenheden. Nu bestaat er een zekere normalisatie van hoogspanningsniveaus in West-Europa; zo zijn in Nederland 110, 150, 220 en 380 kV in gebruik (afb. 4). Wanneer hogere

<sup>1)</sup> Zie hoofdstuk 4.

<sup>2)</sup> Zie hoofdstuk 2.





afb. 4 - Het bestaande hoogspanningsnet in Nederland, alsmede de netten waarvoor het besluit om te bouwen is genomen.

spanningen nodig zouden zijn wordt gediscussieerd over 750 kV of hoger<sup>1)</sup>; hoewel uiteraard hogere spanningen grotere transportcapaciteiten opleveren, hangt het ook nog van de uitvoering af (bijv. het aantal geleiders per bundel) hoe groot die capaciteiten wel zijn. In tabel 1 zijn enige representatieve waarden voor dergelijke transmissielijnen gegeven.

Tabel 1. Globaal overzicht van enige transportcapaciteiten voor verschillende spanningsniveaus.

Spanningsniveaus (kV)	capaciteit per circuit (MVA)	aantal geleiders (per bundel)
110	100	1
150	200	1
220	600	2
380	1500	3

Het laten vergroten van de capaciteit kan eventueel ook nog wel plaats vinden door het aantal geleiders per bundel te vergroten, waarbij de capaciteit ongeveer evenredig met het aantal geleiders toeneemt. Bij hogere spanningen zijn ook om elektrotechnische redenen (sproeien of corona) reeds bundels met meer dan een geleider wenselijk.

Ten tweede zal men, zoals in paragraaf III uiteengezet, een hoogspanningsnet ook voor economische transporten moeten kunnen gebruiken. Daarbij ligt het dan wel voor de hand om aan soortgelijke transportcapaciteiten te denken als hiervóór zijn opgegeven. In het

<sup>1)</sup> Zie hoofdstuk 3.

algemeen worden dan ook de hoogspanningsnetten in Nederland voorzien van twee circuits, waarvan dan het ene circuit als reserve voor noodvoorziening kan dienen en het andere voor economische transmissie.

Ten slotte is het van belang erop te wijzen dat bij een steeds groeiende grootte van de opwekeenheden zowel als bij een stijgend opgesteld vermogen (afb. 1) in het verleden weliswaar ook hogere transmissiespanningen moesten worden toegepast, maar dat de verhoging van deze spanningen naar de mening van de auteur in de toekomst niet meer snel verder zal groeien. Een tweetal argumenten is daarvoor aan te voeren.

Zoals uiteengezet heeft het transmissienet twee functies te vervullen. Bij een storing van een opwekeenheden in een centrale zal het koppelnet een vrij circuit ter beschikking moeten hebben dat het vermogen van — zo nodig — de grootste eenheid in Nederland kan aanvoeren. De grootste thans in aanbouw zijnde eenheid zal een vermogen krijgen van 450 MW, terwijl thans een aanvraag voor een eenheid van 600 MW is uitgestuurd. Zoals in paragraaf 1 werd toegelicht lijkt het niet erg waarschijnlijk dat spoedig opwekeenheden van meer dan 1000 MW zullen worden toegepast.

De transportcapaciteit van het huidige 380 kV-net van 1500 MVA per circuit zoals vermeld in tabel 1 zal dan ook uit veiligheidsoverwegingen voldoende zijn.

Ook voor wat de economische transporten betreft kan hetzelfde worden gezegd. Voor kortdurende piekbelasting zal men niet gaarne overal in Nederland machinevermogen in bedrijf willen stellen. Enerzijds lijkt het zinvol daarvoor eventueel plaatselijk aanwezige snel te starten gasturbines te gebruiken, anderzijds kan het ook plaats vinden door aanvoer van andere centraleplaatsen waar ter wille van meerdere centrales een grote eenheid extra in bedrijf komt. Ook daarvoor is dan een transportcapaciteit via het 2e circuit van 1500 MVA beschikbaar.

Slechts indien in een bepaald gebied van Nederland serieuze beperkingen voor het opwekken van voldoende energie zouden bestaan, bijv. door gebrek aan voldoende koelwater in onze grote rivieren in het oosten en vooral zuid-oosten van Nederland, dan zou de bouw van hetzij meerdere transmissiecircuits, dan wel circuits met hogere spanning nodig kunnen worden voor permanente aanvoer van elektriciteit uit het westen van Nederland.

In de voorgaande beschouwingen is in het bijzonder rekening gehouden met storingen in centrales. Uiteraard zijn ook storingen in de transmissiesystemen zelf mogelijk; om de gevolgen hiervan tot een minimum te beperken wordt er naar gestreefd, ieder transmissiesysteem uit te voeren in de vorm van een gesloten ring, zodat — wanneer er ergens een storing in dit systeem zou optreden — men een aanvoer via de overgebleven ring van twee kanten af kan doen plaatsvinden, waarbij het gehele op de ring aangesloten vermogen ter beschikking blijft staan.

Hoe groot het op te stellen vermogen in een geïntegreerd net mag zijn kan niet eenvoudig worden aangegeven; het hangt wel sterk af van de lengte van de netstukken tussen de aansluitstations. In een land met een zeer grote energiedichtheid per oppervlakte-eenheid zal dat vermogen kleiner moeten zijn dan in landen met veel grotere transportafstanden.



## V. Kosten van de transmissie in een elektriciteitsverzorgingssysteem

Voor een technisch-economische benadering van een transmissiesysteem is het van belang, na te gaan welke fractie van de totale investeringskosten in een elektriciteitsverzorgingssysteem nodig is voor de transmissie. Tabel 2 geeft hierover een globaal overzicht in kolom (bovengronds).

Tabel 2. Relatieve investeringskosten in een elektriciteitsverzorgingssysteem als aanwezig in Nederland.

Onderdeel van het systeem	transmissie	
	bovengronds	ondergronds
Opwekkingsinstallatie	1/3	1/3
Transmissieinstallaties (inclusief transformator- en schakelstations) > 100 kV	1/6	$14 \times 1/12 + 1/12 = 1,25$
Distributieinstallaties	1/2	1/2
Totaal	1	ca. 2

Men moet bij de hier gegeven verhoudingsgetallen wel bedenken dat het transmissiesysteem (> 100 kV) vrijwel geheel bovengronds is, het distributiesysteem grotendeels ondergronds.

De omvang van het transmissiesysteem blijkt uit afb. 4. Wil men nagaan wat de investeringskosten zouden worden voor het ondergronds brengen van de transmissiesystemen, dan is het van belang te weten dat bij bijv. het 380 kV-systeem ca. de ene helft van de kosten samenhangt met de schakel- en transformatorstations en de andere helft met de bovengrondse leidingen.

Het ondergronds maken van die leidingen — aangenomen dat dat zou kunnen zonder de dan nodige compensatiespoelen aan te brengen die voor een compensatie<sup>1)</sup> van de grote capaciteit der ondergrondse kabels nodig zouden zijn — zou dus betrekking hebben op de helft van de in kolom (bovengronds) opgegeven fractie investeringskosten van 1/6; d.w.z.  $1/2 \times 1/6 = 1/12$ .

Wat de extra-kosten van het ondergronds installeren van de bovengrondse netten betreft, deze kunnen aan recente Engelse gegevens worden ontleend (C.E.G.B. Statistical Yearbook 1971). In tabel 17 van dit jaarboek wordt bijv. voor korte kabelstukken — dus zonder compensatiespoelen — aangegeven dat voor 132 kV op een factor 11 . . . 13 moet worden gerekend en voor 380 kV op factoren 15 . . . 16. Neemt men als gemiddelde waarde 14 aan, dan zou dit  $14 \times 1/2 \times 1/6$  betekenen, zoals vermeld in tabel 2.

In totaal levert dit dus voor opwekking, transmissie en distributie tezamen ongeveer een verdubbeling van de investeringskosten op.

Zowel op grond van milieu-, als technische- en economische motieven zal men het ondergronds aanleggen van transmissiesystemen dus onder te beperken tot kortere tracé's, daar waar dat planologisch — gezien de bebouwing of om andere redenen — als noodzakelijk wordt beschouwd.

<sup>1)</sup> Zie hoofdstuk 4.



## Hoofdstuk 2. Algemene technische aspecten van de bovengrondse transmissie

door ir. A. Govers

### Summary

*This chapter deals with the future development of very high voltage transmission in the Netherlands. It sketches the main design features of high voltage lines as well as the most important possibilities and limitations of present day transmission techniques from both mechanical and electro-technical point of view.*

### I. Inleiding

Bij de overdracht van grote hoeveelheden elektrische energie werden aanvankelijk hoogspanningslijnen toegepast. Ondergrondse verbindingen (kabels) werden pas later mogelijk.

De kabeltechniek ijlt na bij de bovengrondse technieken en ondergrondse systemen zijn derhalve bij de invoering van een hoger spanningsniveau niet altijd direct toe te passen. Bovendien is de toepassing van ondergrondse kabels bij hogere spanningen om bedrijfstechnische redenen aan betrekkelijk nauwe grenzen gebonden en zijn de kosten van ondergrondse verbindingen beduidend hoger dan die van hoogspanningslijnen.

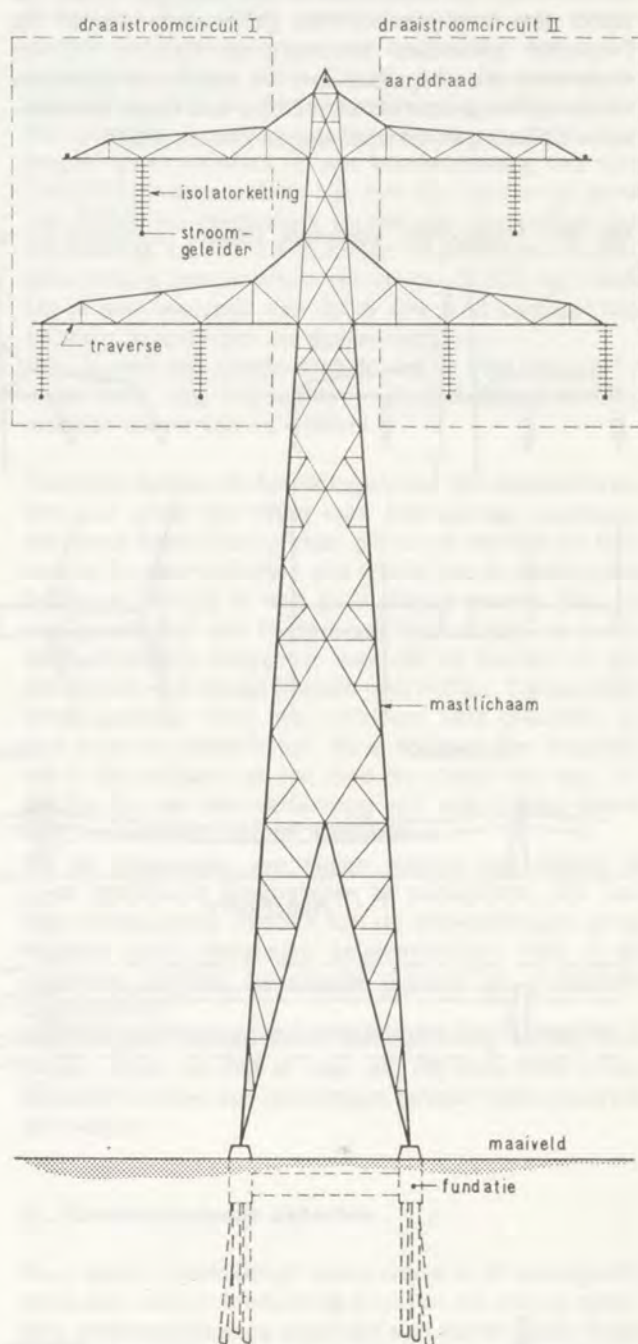
Het is derhalve begrijpelijk, dat grote onderzoekcentra in de wereld, bij het onderzoek van nieuwe transmissiesystemen voor zeer hoge spanningen, allereerst de mogelijkheden van bovengrondse transmissie bestuderen.

In ons land is, zoals hierna zal worden besproken, de invoering van een transmissiespanning in het megavoltgebied — indien deze al noodzakelijk zou blijken — hoogst waarschijnlijk niet voor het einde van deze eeuw te verwachten. Men kan zich dan afvragen of het bespreken van dergelijke transmissiesystemen wel zin heeft, ook omdat in de toekomst mogelijk nieuwe technieken zullen worden ontwikkeld, die de huidige technische beperkingen of zelfs de behoeften, die thans worden voorzien, sterk kunnen beïnvloeden. Er zijn evenwel zoveel belangrijke aspecten aan de toekomst van de bovengrondse transmissie verbonden, dat een korte blik vooruit — alhoewel uiteraard onvolledig — verantwoord is.

### II. Technische aspecten

#### A. Algemeen

Alvorens de toekomstige ontwikkeling van de bovengrondse transmissie te bespreken, zullen enkele civiel- en elektrotechnische aspecten worden behandeld.



afb. 1a - Hoogspanningsmast van het in Nederland veelvuldig toegepaste "Donau" type.



Toen aan het begin van deze eeuw de elektriciteitsbedrijven tot het elektrificeren van verder gelegen gebieden dan de naaste omgeving van de centrale en zelfs tot onderlinge koppeling met andere centrales overgingen werden twee zaken duidelijk:

- Ten eerste werd een hogere spanning noodzakelijk om de grotere elektrische vermogens over grotere afstanden te kunnen transporteren.
- Ten tweede bleek bovengronds transport, dankzij de eenvoudige isolatie (glas, porselein en lucht) de enige bevredigende, economisch verantwoorde en snel te verwerkelijken oplossing.

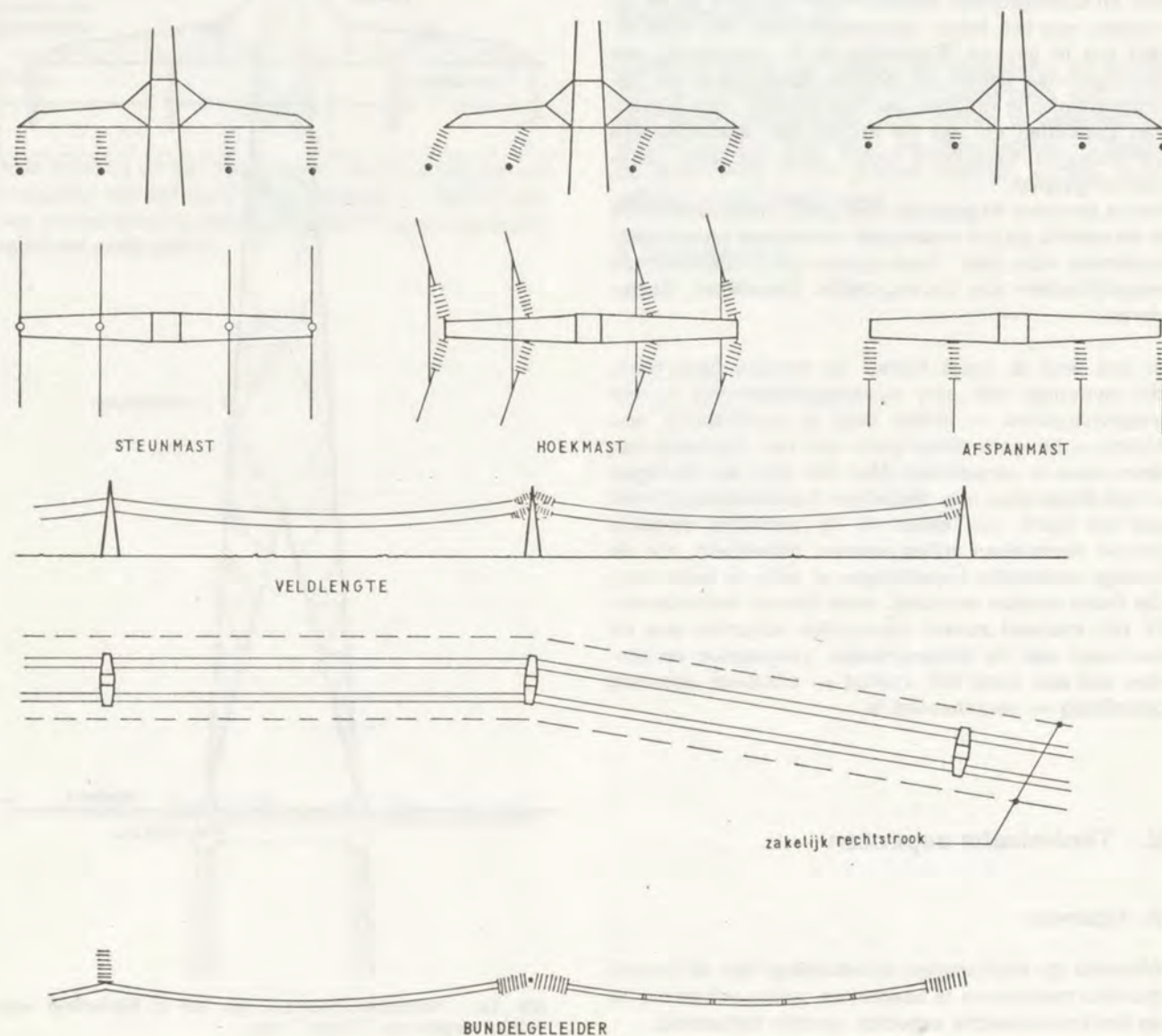
Deze beide inzichten gelden ook thans nog en zullen voor vele jaren in de toekomst hun waarde behouden. De bouw van de bovengrondse transmissielijnen wordt, afgezien van de hierna te behandelen zeer belangrijke elektrotechnische aspecten, beheerst door bouwkundige en mechanische overwegingen omdat de onder spanning staande niet geïsoleerde draden op bepaalde afstanden bovengronds moeten worden ondersteund en afgespannen. De draden of geleiders en de ophangconstructies worden aan hoge mechanische belastingen en spanningen onderworpen.

Het ontwerp van bovengrondse lijnen is overal ter wereld onderworpen aan voorschriften waarin minimum voorwaarden zijn vastgelegd die beogen de mens en zijn have en goed te beveiligen tegen onder spanning staande leidingen met de daaraan verbonden gevaren. De Nederlandse voorschriften zijn neergelegd in de Voorschriften voor bovengrondse hoogspanningslijnen NEN 1060 van het Nederlands Normalisatie Instituut; een speciale commissie houdt zich bij voortdurend bezig met het bijwerken van deze voorschriften. In het kort behelzen deze eisen de minimale afstanden die aangehouden moeten worden tussen onder spanning staande delen enerzijds en mastonderdelen, opstallen en aarde anderzijds. Voorts worden mechanische veiligheidsfactoren en materiaaleisen aangegeven voor geleiders, isolatoren en mastconstructies, alsmede maximale wind- en ijsbelastingen, die geacht worden op het geheel te kunnen inwerken.

### B. Constructieve aspecten

Als geleidermateriaal wordt tegenwoordig vrijwel uitsluitend staalaluminium toegepast. In de kuststreken

afb. 1b - Mastsoorten, veldlengte, zakelijk rechtstrook en bundelgeleider.





vindt koper, al is het aanmerkelijk duurder, om zijn corrosiebestendigheid nog steeds toepassing. Staal-aluminium kabels bevatten een stalen kern om het geheel de nodige sterkte te geven; daaromheen zijn aluminium draden geslagen voor de stroomgeleiding. Met de introductie van staal-aluminium en andere soorten kabel werden strakker gespannen geleiders en grotere mastafstanden mogelijk.

De geleiders worden op onderling vrijwel gelijke afstanden opgehangen aan masten; men onderscheidt in hoofdzaak drie typen masten (afb. 1b):

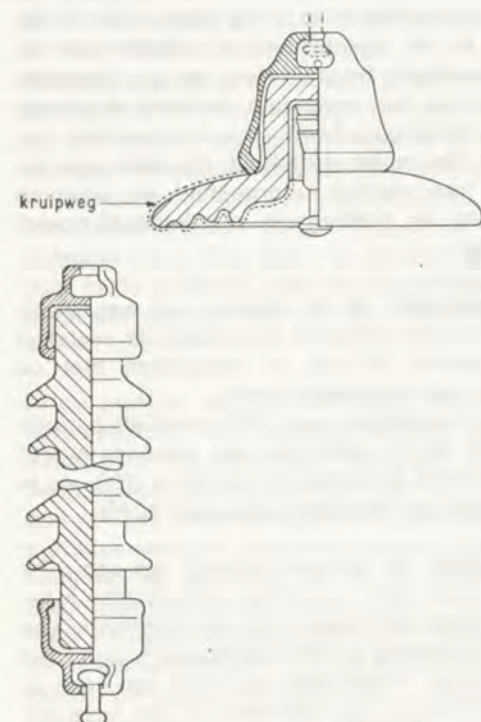
- *steunmasten*, die worden belast op gewicht, ijs en wind;
- *hoekmasten*, die ook nog met geleider-spankrachten worden belast en
- *afspanmasten*, die daarenboven de volle eenzijdige trek van alle afgespannen geleiderkabels moeten kunnen ondergaan.

Boven de geleiders zijn direct aan de stalen mast aarddraden bevestigd die ertoe dienen blikseminslag in de geleiders te voorkomen (Faraday-kooi); deze hebben een aanmerkelijk geringere doorsnede dan de normale stroomgeleiders.

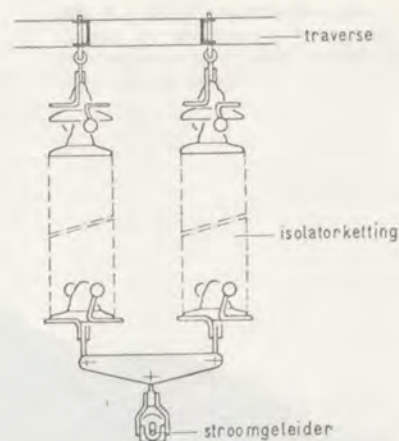
De bevestiging van de geleiders aan de masten vindt plaats d.m.v. isolatorkettingen, bestaande of uit een groot aantal zogenaamde kap- en klepelisolatoren of uit enkele zgn. langstaaaisolators (afb. 2). Deze isolators zijn vervaardigd uit porselein of glas, dezelfde constructie- en isolatiematerialen die nu bijna een eeuw geleden bij de eerste bovengrondse verbindingen werden toegepast.

In afb. 1 en 2 zijn de vormgeving en enkele benamingen van een mastconstructie met bijbehoren gegeven.

De grootte van de krachten, die bij een normaal in ons land gebruikte overspanning optreden zijn niet gering.



afb. 2a - Enkele isolatortypen.



afb. 2b - Door middel van een dubbele isolatorketting opgehangen stroomgeleider.

Buitendien zijn elders enkele overspanningen toegepast die vele malen groter zijn en dus aan een enorm krachtenspel bloot staan. Zo zijn bijv. de staal-aluminium kabels van de Sognefjordkruising in Noorwegen (de grootste overspanning ter wereld van bijna 5 km lengte) geconstrueerd op een breukbelasting van ruim 100.000 kgf; deze kabels zijn met een kracht van meer dan 40.000 kgf gespannen en met een zesvoudige isolatorketting aan de steunpunten opgehangen, waarbij elke ketting een breukbelasting van 30.000 kgf heeft. Dit is een veelvoud van de in ons land normaal toegepaste belastingen en spanningen.

Afb. 3 geeft een goede aanblik van de veel kleinere — maar toch nog imposante — Sogndalsfjord-kruising met een lengte van ca. 1500 m.

Tenslotte spelen de funderingen van de mastconstructies een grote rol. Waar men een stevige bodemgesteldheid heeft kan op staal gebouwd worden en kunnen de funderingskosten een fractie van de mastkosten bedragen, terwijl in een zeer slappe bodem (bijv. in een groot deel van Nederland) funderingen op palen moeten worden toegepast, waarvan de kosten die van de masten vele malen kunnen overtreffen. Tussen deze twee uitersten vindt men uiteraard vele gradaties en dus grote prijsverschillen. Zo is het zeer wel mogelijk, dat in het westen van het land de kosten van een 150 kV-lijn die van een verbinding van veel hogere spanning op hechtere bodem evenaren.

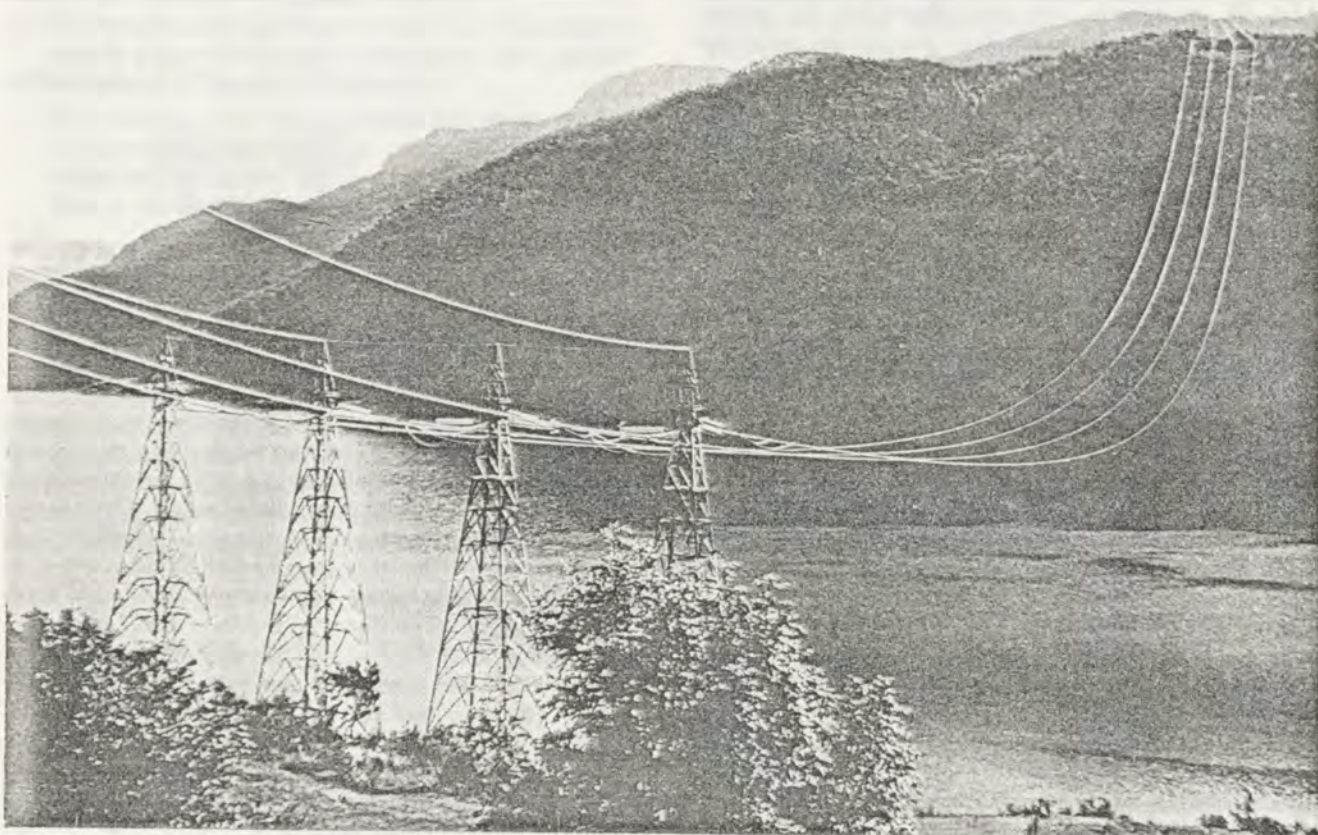
Bij de toepassing van stalen masten zijn weinig of geen praktische tegenslagen te verwachten. De huidige constructies voldoen aan de verwachtingen en er bestaan geen wezenlijke belemmeringen voor in de toekomst wellicht benodigde grotere en zwaardere constructies.

Lijntrillingen vormen thans een soms nog ernstig probleem, maar het ziet er naar uit, dat men deze moeilijkheden binnen een decennium geheel onder controle zal hebben.

### C. Electrotechnische aspecten

Voor minder deskundige lezers wordt in de navolgende tekst een nadere toelichting gegeven op enkele specifieke electrotechnische aspecten van transmissie, mede ter verduidelijking van in hoofdstuk 3 gebezigde begrippen.





afb. 3 - De Sogndalsfjordkruising voor een 275 kV transmissielijn aan de westkust van Noorwegen. (foto NVE Statskraftverkene, Oslo).

#### 1. Algemene en bedrijfstechnische beschouwing

Het transmissienetwerk vormt, samen met de opwekkmiddelen en de distributienetten, een zeer gecompliceerd elektromagnetisch systeem, bestaande uit een aantal weerstanden van verschillende aard, waarop een elektrische spanning wordt gedrukt en gehandhaafd. Op bepaalde plaatsen in dit systeem (de elektrische centrales) wordt een energiestroom opgewekt die op andere plaatsen (bij de verbruikers) wordt afgenomen.

Er wordt gebruik gemaakt van naar grootte met de tijd wisselende spanningen en stromen in de bijzondere vorm die *driefasen-wisselstroom* of wel: "*draaistroom*" wordt genoemd. Hierbij zijn drie spanningen en stromen betrokken met drie bijbehorende geleiders, *fases* genaamd, die samen een circuit en een compleet draaistroomoverbrengingskanaal vormen. De drie fases van een transmissiesysteem zijn in een bovengrondse verbinding duidelijk zichtbaar (zie afb. 1).

Hier komt het begrip fase naar voren, dat ook een andere betekenis kan hebben. In de wisselstroomtheorie geeft de fase van een periodiek veranderende stroom of spanning aan in welk stadium het periodieke verschijnsel zich bevindt.

De spanningen en stromen van een draaistroomstelsel veranderen sinusvormig met de tijd en volgen elkaar met gelijke tijdsintervallen op. Schrijft men voor een

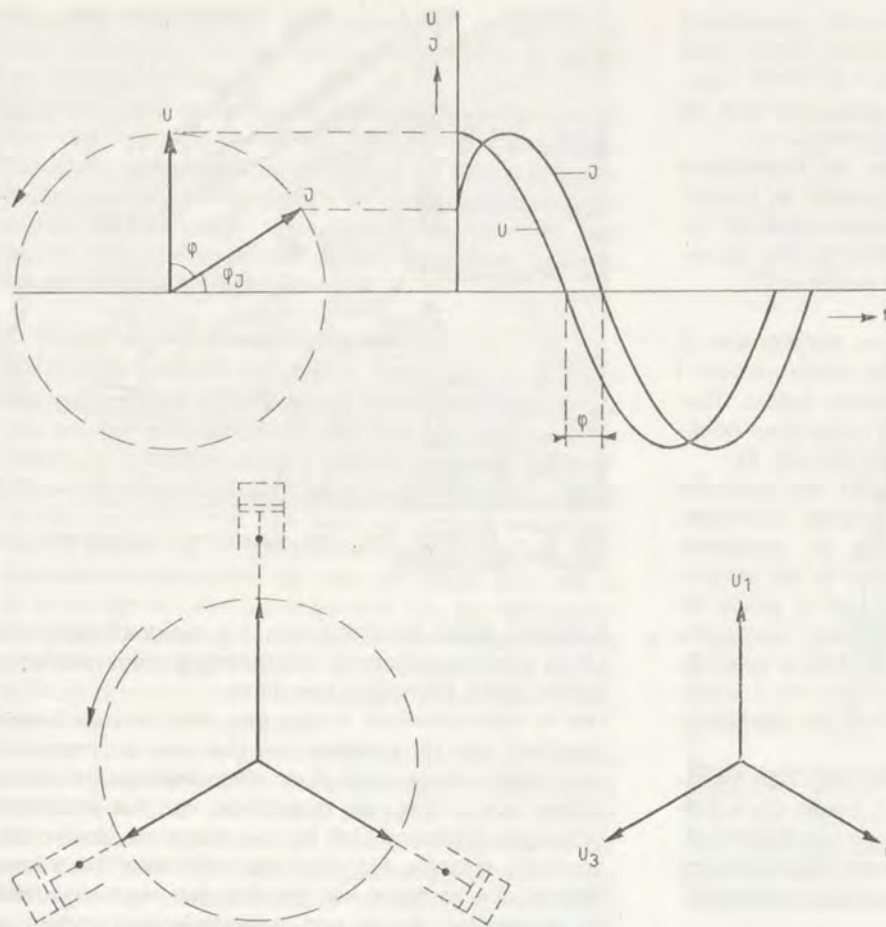
willekeurige stroomsterkte  $i = I_m \sin 2\pi ft$  (waarin  $I_m$  de maximale waarde van de stroom,  $f$  de frequentie en  $t$  de tijdsduur die verlopen is na de nulwaarde van de stroom) dan is de ogenblikkelijke waarde van de stroomsterkte volledig bepaald door de zgn. fasehoek  $\varphi = 2\pi ft$  die een met constante snelheid draaiende cirkelstraal  $I_m$  doorlopen heeft sedert het tijdstip  $t = 0$  (afb. 4). Een dergelijke grootte, die door een gericht lijnstuk kan worden voorgesteld en waarvan grootte, richting en richtingszin zijn bepaald noemt men een vector.

Zowel de spanningen als de stromen van een draaistroomstelsel kunnen derhalve als draaiende vectoren worden voorgesteld, in afb. 4 vergeleken met de krukarmen van een driecilindermotor.

Een volledige omwenteling over  $360^\circ$  wordt als periode aangeduid. Het aantal perioden per seconde wordt frequentie genoemd en uitgedrukt in Hertz (Hz); de in Europa gebruikelijke frequentie bedraagt 50 Hz.

Het zal nu duidelijk zijn dat men spreekt van een driefasensysteem met  $120^\circ$  in de tijd verschoven fasestromen resp. fasespanningen, met een frequentie van 50 Hz. De fasespanning en de fasestroom kunnen ten opzichte van elkaar verschoven zijn over een hoek  $\varphi$ , de faseverschuiving of het hoekverschil. Het hoekverschil betekent eenvoudig, dat de betrokken trillingen niet gelijktijdig door de nulstand gaan. De trillingen in





afb. 4 - De sinusvormige spanningen en stromen in een draai-stroomsysteem en een vectoriële voorstelling daarvan.

afb. 4 zijn gelijk, maar niet gelijktijdig (niet in fase).  $U$  is de voorijlende,  $I$  de naijlende golf. Deze ongelijktijdigheid wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van capaciteiten en inductiviteiten (elektrische en magnetische velden) in het netwerk.

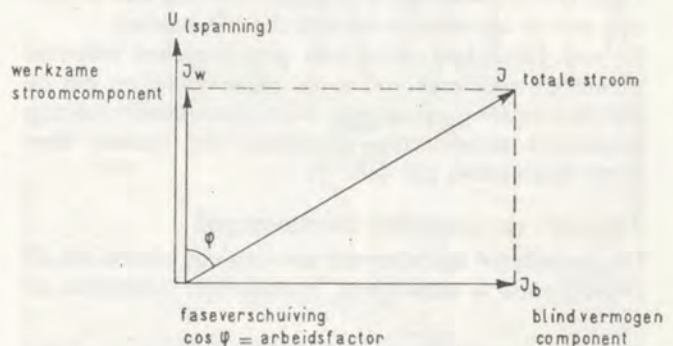
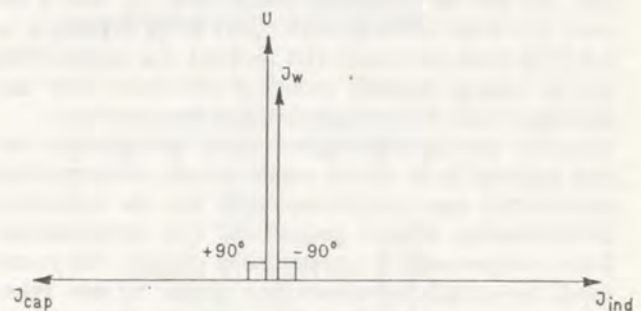
*Werkzaam vermogen, blindvermogen en schijnbaar vermogen (afb. 5)*

Een transmissienet is uiteraard in de eerste plaats bestemd voor het transport van *werkzaam vermogen*, dat bij de verbruikers kan worden omgezet in andere energievormen, als licht, kracht en warmte. De met dit werkzame vermogen corresponderende stroomcomponent heet *werkzame stroom* ( $I_w$ ), die in fase is met de netspanning  $U$ . Een deel van dit werkzame vermogen gaat in de geleiders van het transmissiesysteem verloren als warmte, die aan de omgeving wordt afgestaan.

In de praktijk kan de theoretisch beschikbare transportcapaciteit niet volledig worden benut voor de overdracht van werkzaam vermogen, doch dient gedeeltelijk ter beschikking te staan voor het overbrengen van zgn. *blindvermogen*. De met dit blindvermogen corresponderende stroomcomponent die  $90^\circ$  voor- of najlt op de spanning en op de werkzame stroom, duidt men aan als *blindstroom*. ( $I_b$  in afb. 5).

Voor de instandhouding van voor enkele soorten van vermogensoverdracht (bijv. in motoren of transformatoren) benodigde magnetische velden is inductief blindvermogen nodig; de daarmee corresponderende *inductieve blindstroom* ijlt  $90^\circ$  na op de spanning.

De transmissienetdelen gedragen zich onderling en t.o.v. aarde als condensatoren, ze hebben een zekere bedrijfscapaciteit. Daardoor vloeit in bedrijf een capacatieve laadstroom en wordt capacatief blindvermogen



afb. 5 - Vectoriële voorstelling van diverse stroomcomponenten.



gevraagd. De daarmee corresponderende *capacitieve* blindstroom ijlt  $90^\circ$  voor op de spanning. Soms komt ook bij de afnemers een *capacitieve* blindlast voor, terwijl ook rekening moet worden gehouden met de *capacitieve* blindlast van distributienetten.

De inductieve blindstroom ( $I_{ind}$ ) en de *capacitieve* blindstroom ( $I_{cap}$ ) zijn tegengesteld gericht; zij kunnen elkaar geheel of gedeeltelijk compenseren (zie afb. 5). De inductieve component is gewoonlijk groter, de resulterende blindstroom  $I_b$  is dan dus inductief.

De werkzame  $I_w$  en de resulterende blindstroom  $I_b$  kunnen worden samengesteld tot de totale stroom  $I$  waarmee het transmissiesysteem wordt belast. Tussen de stromen  $I$  en  $I_w$  treedt dan het besproken hoekverschil, of de faseverschuiving,  $\varphi$  op (zie afb. 5).

Het totale vermogen, zijnde het produkt van spanning en totale stroom,  $U \times I$ , wordt *schijnbaar vermogen* genoemd; het produkt van spanning en werkzame stroom ( $U \times I_w$  of wel  $U \times I \times \cos \varphi$ ) is het eerdergenoemde *werkzame vermogen*. De  $\cos \varphi$ , zijnde de verhouding tussen werkzaam en schijnbaar vermogen, wordt de *arbeidsfactor* genoemd. Een kleine arbeidsfactor betekent, dat men grotere stromen moet transporteren dan strikt noodzakelijk is voor het werkzame vermogenstransport.

Blindstromen beïnvloeden het gedrag van een transmissielijn en de mogelijkheid tot overdracht van werkzame vermogen. De prijs en de kwaliteit van de stroomlevering<sup>1)</sup> kunnen in het geding komen; daarop wordt hieronder nader ingegaan.

#### Transport van inductief blindvermogen

Transport van inductief blindvermogen over een bovengrondse verbinding, kan een aanzienlijk en soms onaanvaardbaar groot spanningsverlies veroorzaken (tot het 5- tot 10-voud van wat optreedt bij een werkzaam vermogenstransport). Voorts geeft het aanleiding tot hogere transmissieverliezen ( $I^2R$ ), omdat de stroom  $I$  die totaal door de verbinding vloeit aanzienlijk hoger kan zijn dan de werkzame component  $I \times \cos \varphi$  die voor het reële vermogenstransport zorgt (bij  $\cos \varphi = 0,8$  50% meer verliezen). Het verdient dus aanbeveling om zo weinig mogelijk inductief vermogen over een bovengrondse transmissieleiding te transporteren.

Inductief vermogenstransport wordt op tweeërlei manier beperkt. In de eerste plaats vormen ondergrondse kabelnetten een bedrijfscapaciteit die de inductieve blindbelasting althans gedeeltelijk kan compenseren. Deze compensatie is constant van grootte. Het resterende benodigde blindvermogen wordt, tot een zeker maximum, geleverd door de voedende generatoren. Deze blindlastlevering is regelbaar en dus aan te passen aan de variaties in de inductieve belasting.

Bij een chronisch tekort aan geproduceerd inductief vermogen stelt men wel extra generatoren op die de blindlastregeling verzorgen. Deze generatoren worden synchrone generatoren genoemd. Het kunnen zeer grote aggregaten zijn (afb. 6).

#### Transport van capacitief blindvermogen

De *capacitieve* laadstromen van een net, vooral als dit ondergronds is uitgevoerd, vormen een hinderlijke en

<sup>1)</sup> Hieronder verstaat men een zo betrouwbaar mogelijke elektriciteitslevering bij nagenoeg constante spanning en frequentie.



afb. 6 - Montage van een synchrone compensator 345 MVAR<sup>2)</sup> (Foto ASEA).

kostbare eigen belasting van het elektriciteitsbedrijf. Dit te meer naarmate de netspanning stijgt, omdat de laadstromen evenredig toenemen.

Het is oneconomisch indien een deel van de belastbaarheid van de geleider (en dus van de transportcapaciteit) teloor gaat door doorvloeiing met blindstroom die niet tot de overdracht van het werkzaam vermogen bijdraagt. Ook bij een onbelaste, doch onder spanning staande, lijn vloeit de volle *capacitieve* laadstroom, die zo groot kan worden dat van enige reële vermogensoverdracht nog ternauwernood sprake is. De laadstroom kan bij bovengrondse lijnen bij toenemende spanning oplopen tot ca 1 A/km per geleider (380 kV), bij grondkabels tot omstreeks 25 A/km! Men gaat dus ook om deze bedrijfstechnische reden al niet licht over tot toepassing van kabels i.p.v. bovengrondse lijnen.

Ter vermindering van de laadstroombelasting wordt wel inductieve compensatie toegepast, veelal ondergebracht in de in een transmissienet aanwezige schakel- en transformatorstations. Zo zijn in de Nederlandse 380 kV-transformatorstations laadstroomcompensatiespoelen met een blindvermogen (reactief vermogen) van 45 MVAR<sup>2)</sup> opgesteld, die naar behoefte worden bij- of afgeschakeld, teneinde de blindstroomhuishouding in de hand te kunnen houden.

#### Natuurlijk vermogen

Een goede maat voor het vermogen dat over een verbinding kan worden overgebracht zonder dat tot compensatie — hetzij inductief, hetzij capacitief — behoefte te worden overgegaan, is het zgn. *natuurlijk vermogen* van een draaistroomverbinding.

Voor elke geleiderconfiguratie en spanning kan de gunstigste belasting van een transmissielijn worden bepaald, waarbij evenwicht bestaat tussen inductief (door de belasting veroorzaakt) en capacitief (door de spanning bepaald) blindvermogen van de verbinding. Er wordt dan uitsluitend werkzaam vermogen getransporteerd en de verbinding behoeft geen blindvermogen. Bij overdracht van werkzaam vermogen beneden het natuurlijk vermogen gedraagt een verbinding zich capacitief, daarboven inductief. Bij werkzaam vermogen

<sup>2)</sup> Reactief vermogen wordt uitgedrukt in VAR ( $r$  = reactief).



transport dient er dus gecompenseerd te worden al naar gelang men de lijn aanmerkelijk onder of boven dit vermogen belast.

Bij grondkabel bedraagt het natuurlijk vermogen ongeveer het tienvoudige van dat bij bovengrondse lijnen, hetgeen betekent, dat dit vermogen bij kabels in tegenstelling tot de verhoudingen bij bovengrondse lijnen boven de thermisch toelaatbare stroomsterkte ligt; kabelnetten gedragen zich onder alle normale bedrijfsomstandigheden altijd capaciteef.

## 2. Isolatie bij hoogspanningslijnen

De isolatie dient zodanig te worden gekozen dat aan alle onder bedrijf optredende spanningen het hoofd kan worden geboden. Uiteraard valt hier allereerst de nominale bedrijfsspanning onder, waarbij bedrijfsfrequente spanningsverhogingen van ca. 15...30% kunnen optreden met een duur van enkele seconden. Voorts treden bij schakelhandelingen in het net zgn. schakeloverspanningen op met een totale duur die in de buurt ligt van een halve periode van de netfrequentie. Door toepassing van moderne schakelaars kan dit type overspanningen tot het 2 à 3-voudige van de bedrijfsspanning beperkt worden; men noemt deze overspanningen *intern* van aard.

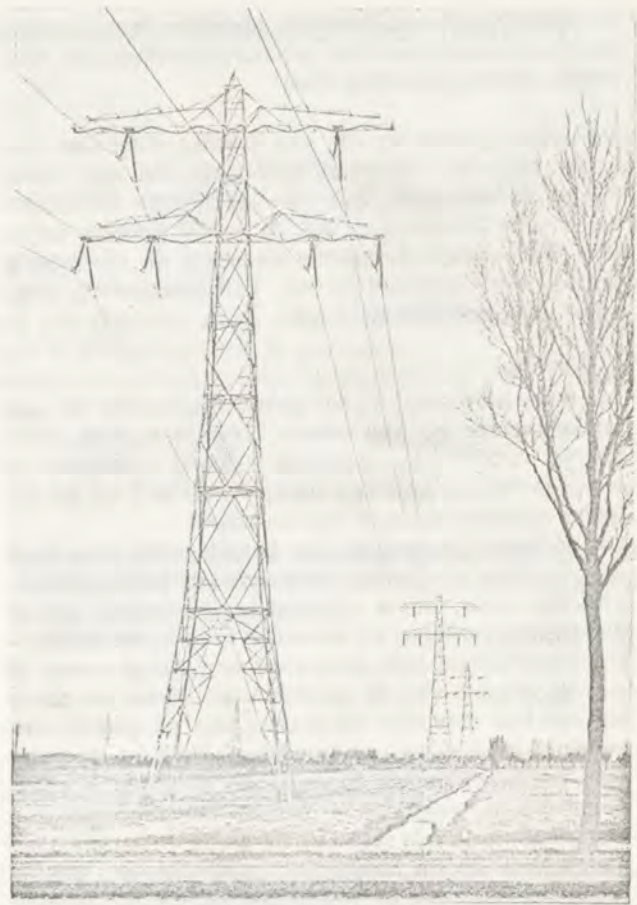
Externe overspanningen worden door atmosferische ontladingsverschijnselen teweeggebracht (bliksem); zij hebben een duur van enkele tientallen  $\mu$ s en kunnen een maximum bereiken van enkele honderden kV tot meerdere MV. De beveiligingsmaatregelen die men hiertegen kan nemen bestaan uit (in Nederland altijd aangebrachte) aarddraden boven de circuits, goede mastaarding, overspanningsafleiders en condensatoren.

Er zijn nu twee omstandigheden waardoor men in staat is een net en de bijbehorende apparatuur te beveiligen tegen de mogelijk desastreuze gevolgen van overspanningen (overslag, doorslag, brand of explosie):

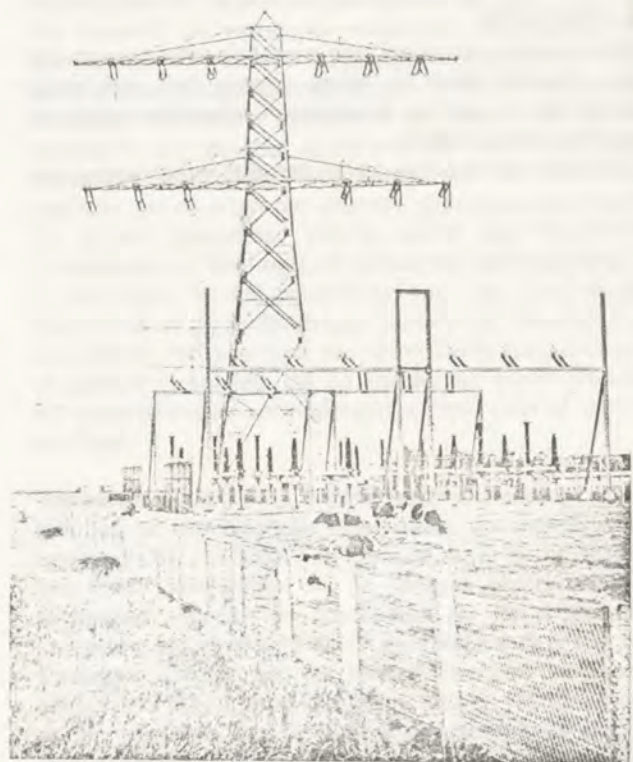
— Allereerst is elk isolatiemateriaal — of dat nu lucht, porselein of een ander materiaal is — aanzienlijk beter bestand tegen hogere spanningen van korte dan van lange duur.

— Ten tweede kan men de isolatiesterkte van de bedrijfsmiddelen verschillend kiezen; men spreekt dan van coördinatie van de isolatie, waarbij voor verschillende bedrijfsmiddelen verschillende isolatieniveaus worden gekozen. Het doel daarvan is, doorslagen binnen bedrijfsmiddelen te verhinderen. Niet te vermijden overslagen (overslag is doorslag door lucht, al dan niet langs een isolatie-oppervlak) worden tot die plaatsen van lijnen en stations beperkt waar zo weinig mogelijk schade wordt veroorzaakt en het bedrijf weinig of niet wordt gestoord. Daarom wordt een hoge isolatiesterkte gekozen voor de interne isolatie van transformatoren en andere afgesloten of moeilijk toegankelijke isolatiedelen in lucht; een lager niveau kan dan gelden voor isolatie in lucht, zoals luchtlijnen. Hierbij kan een vaste waarde worden bereikt door toepassing van overspanningsafleiders.

Voorts treedt het merkwaardige verschijnsel op, dat de totale over een isolatorketting staande spanning (tussen de gearde traverse en geleider) niet evenredig over de afzonderlijke isolatoren is verdeeld, maar zich aan de spanningszijde a.h.w. ophoopt. Deze spanningsverdeling heeft een ongunstige invloed op



afb. 7 - Serie steunmasten in de 150 kV-verbinding Dordrecht-Krimpen a.d. IJssel. (Foto E.Z.H.)



afb. 8 - Eindmast 150 kV, voor 4 circuits; ook geschikt voor 380 kV, 2 circuits. (Foto E.Z.H.)



de lengte van de isolatorketting, omdat men uit praktische overwegingen alle isolatorelementen van eenzelfde overslagspanning kiest.

De overslagspanning van een isolator moet dus veel hoger zijn dan de bedrijfsspanning om een ruime marge te verkrijgen voor de beschreven abnormale elektrische belastingen, die bij bedrijf kunnen optreden. Bij normale frequentie bedraagt de verhouding tussen overslagspanning en bedrijfsspanning (een soort veiligheidsfactor) 3 à 4.

### 3. Corona

Als de spanningsval bij het geleideroppervlak van een bovengrondse lijn een zekere kritische waarde overschrijdt wordt een knetterend geluid hoorbaar en wordt (in het donker) een lichtgevende laag om de geleider zichtbaar die men corona noemt.

Dit omhulsel bestaat uit een geïoniseerde laag lucht die geleidend is. Corona veroorzaakt hinderlijke neveneffecten zoals, naast voornoemd knetterend geluid, elektrische verliezen en storingen in radioontvangst.

De mogelijkheid van coronavorming hangt zowel af van de afstand van de geleiders tot elkaar en aarde als van hun diameter. Vergroting van de geleiderdiameter of toepassing van *bundelgeleiders* (meer geleiders per fase; zie afb. 1) verhogen de kritische spanningswaarde, waardoor — samen met goed gekozen afstanden tussen de fasen en tot aarde — het ontstaan van corona en de hinderlijke neveneffecten, althans onder normale weersomstandigheden, kunnen worden voorkomen.

Alhoewel het van groot belang is om een lijn zoveel mogelijk van corona te vrijwaren, is het onmogelijk om een hoogspanningslijn te allen tijde coronavrij te houden. Corona treedt echter gedurende korte perioden op en de geluidshinder is op een afstand van enkele tientallen meters van de lijn verwaarloosbaar klein.

### 4. Netontwerp

Het is nuttig iets te zeggen over het ontwerp van netten. Daarbij staat de vraag voorop hoe een transmissienet op een zo economisch mogelijke wijze ontworpen kan worden.

Voor het eenvoudige geval van het overbrengen van

een grote hoeveelheid elektriciteit van een centrale waar overvloedig energie kan worden opgewekt naar een veraf gelegen afnemer (bulktransport) is de oplossing niet al te moeilijk te vinden. Indien vermogen, afstand, belastingsduur, prijzen van brandstoffen en materialen, enz. bekend zijn (en deze factoren zijn heden ten dage maar gedurende een betrekkelijk korte tijd constant), kan men de meest economische transmissiespanning, geleiderdoorsnede en mastconstructie berekenen.

In de praktijk — en zeker voor Nederland — liggen de problemen voor een nieuw te bouwen transmissiesysteem niet zo eenvoudig. Zo kan de transmissiespanning niet vrijelijk worden bepaald, doch moet worden gekozen uit enkele genormaliseerde spanningen. Dankzij de normalisatie kan de fabrikant zich bij zijn ontwerpen concentreren op enkele nominale spanningen, hetgeen een economische produktie mogelijk maakt. Bovendien dient het elektriciteitsbedrijf aandacht te schenken aan netspanningen die in naburige systemen worden gehanteerd: een gemeenschappelijke spanning vereenvoudigt de koppelmogelijkheden, waardoor op simpele en goedkope wijze vermogens kunnen worden uitgewisseld en financiële besparingen kunnen worden bereikt. Voordelen van deze aard kunnen zeer wel opwegen tegen een spanningskeuze die alleen gegrond zou zijn op de laagste transmissiekosten.

Voorts is het erg moeilijk om de meest economische geleiderdoorsnede op voorhand te bepalen, omdat de maximale belasting, de groei daarvan en de energiekosten buitengewoon onzekere factoren zijn. Bij koppelnetten varieert de belasting bovendien zeer sterk, zodat het transportvermogen voornamelijk bepaald gaat worden door de belasting die in noodgevallen getransporteerd moet worden.

Gezien deze onzekerheden en staande voor de keuze van een ontwerp voor een nieuw net kan men, indien de relatieve belastingstoename niet vermindert, daarom zowel spanning als transportvermogen beter aan de hoge dan aan de lage kant kiezen. Een algemeen aanvaarde vuistregel is dat voor een nieuw spanningsniveau het 2,5 tot 3-voud van het bestaande niveau economisch het meest aantrekkelijk is.



# Hoofdstuk 3. De toekomst van de bovengrondse transmissie<sup>1)</sup>

door ir. A. Govers

## Summary

*After a general review of the latest worldwide developments and research in the field of very high voltage transmission engineering the future application of such techniques in the Netherlands is evaluated. The conclusion may be drawn that, if at all, the matter of introduction of high voltage transmission in the megavolt-range will not arise before the turn of the century.*

## I. Uitgangspunten

De volgende uitgangspunten kunnen op grond van de in hoofdstuk 2 besproken technische aspecten van de bovengrondse energietransmissie worden gesteld:

1. Ook in de toekomst — als het tot de invoering van een nog hoger spanningsniveau dan de bestaande 380 kV zou komen — zal een belangrijk deel van de transmissieverbindingen bovengronds moeten worden uitgevoerd. Daarbij is aangenomen dat geen revolutionaire ontwikkelingen op het gebied van de ondergrondse transmissie zouden plaatsvinden. Bovengrondse lijnen blijven dan het eenvoudigst, het meest economisch en het snelst te realiseren. Het hogere spanningsniveau zou op het 2,5 à 3-voud van 380 kV komen te liggen.
2. De invoering van een dergelijk hoger spanningsniveau zal ongetwijfeld zwaardere en grotere mast- en geleiderconstructies tengevolge hebben.
3. Het transport van werkzaam vermogen zal in ons land, met zijn betrekkelijk geringe afstanden, vanuit elektrotechnisch standpunt praktisch aan geen belemmeringen onderhevig zijn.
4. Het transport van inductief blindvermogen over een bovengronds hoogspanningsnet dient — niet alleen onder normale bedrijfsomstandigheden, maar ook in geval van storingsomstandigheden — te worden beperkt, teneinde extreme spanningsvariaties en onnodig grote verliezen in het net te voorkomen.
5. Ondergrondse verbindingen zullen, voor zover technisch uitvoerbaar, zo kort mogelijk dienen te worden gehouden.
6. De toepassingsmogelijkheid van zowel boven- als ondergrondse systemen wordt door velerlei factoren bepaald; een volledig vrije keuze is uitgesloten.
7. Een goede verdeling over het land van nog te stichten productiecentra, dicht bij de grote afname-

concentraties, zou zeer wezenlijk kunnen bijdragen tot het beperken van uitbreidingen van het bovengrondse elektriciteitstransportsysteem.

## II. Ontwikkeling van de toekomstige bovengrondse transmissie

Het is nuttig om allereerst enige aandacht te schenken aan de transportmogelijkheid door middel van gelijkstroom. De laatste jaren heeft de toepassing daarvan een zeer snelle ontwikkeling doorgemaakt. Een aan de draaistroomtransmissie gelijkwaardige oplossing voor de toekomstige transmissieproblemen kan evenwel op korte termijn niet worden verwacht: zo bestaan er nog geen gelijkstroomvermogenschakelaars zodat een vermaasd netwerk, zoals dat bij draaistroom te verwezenlijken is, vooreerst onmogelijk zal zijn.

Dit beperkt de technisch mogelijke toepassing van gelijkstroom onder zeer hoge spanningen (voor zover te voorzien valt gedurende minstens het komende decennium) tot enkele specifieke gebieden. Het eerste gebied is dat van het bulktransport over zeer grote afstanden, waarbij de hoge kosten van de omvormerstations aan de uiteinden worden gecompenseerd door de lagere lijnkosten. Voorts wordt een dergelijke transmissie — die nog niet voldoende bedrijfszeker is — toegepast bij het penetreren van een groot stedelijk gebied of bij verbindingen tussen het vasteland en een eiland. Het voordeel van deze beide toepassingen is gelegen in het feit, dat de kosten van bovengrondse en ondergrondse verbindingen elkaar daarbij weinig ontlopen.

Wij keren terug tot de draaistroomtransmissie.

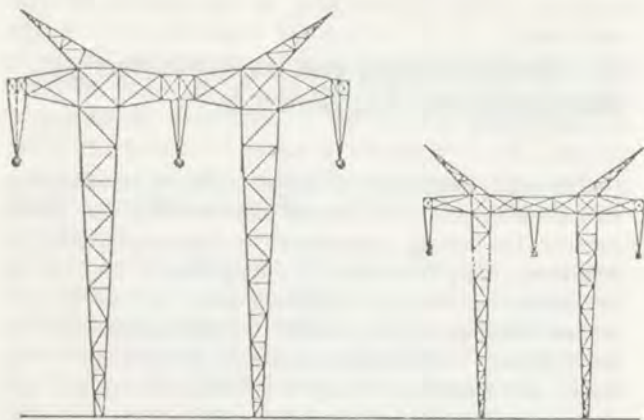
Het tot nu toe hoogste toegepaste spanningsniveau bedraagt 700 . . . 800 kV in Canada en in de USSR. Bij het thans allerwegen in de wereld plaatsvindende onderzoek worden de problemen bij de toepassing van spanningen van 1100 kV en 1500 kV naarstig bestudeerd. Zonder aan de elders verrichte moeizame arbeid iets tekort te willen doen, mogen hier zeker de onderzoeken van de Zweeds-Amerikaanse ASEA-AEP groep, van de Electricité de France, alsmede het Waltz-Mill-project in de Verenigde Staten niet onvermeld blijven. (Laatstgenoemd project is opgezet door

<sup>1)</sup> Voor een nadere toelichting op de in dit hoofdstuk gebezigde elektrotechnische begrippen zij verwezen naar hoofdstuk 2, § II.C ("elektrotechnische aspecten").



de Electricity Research Council in de V.S. en uitgevoerd door Westinghouse). Eerst in de laatste jaren is gebleken, dat de hiervoor genoemde draaistroomspanningen van 1100 kV en 1500 kV niet onmogelijk zijn; dit alhoewel in deze spanningsgebieden de vereiste afstanden van de geleiders tot de mastconstructies sterker dan lineair met de spanning toenemen.

De hoogte van de schakeloverspanningen wordt daarbij bepalend voor het isolatieniveau omdat de voor atmosferische overspanningen vereiste afstanden met toenemende spanningen minder dan lineair toenemen bij toenemende bedrijfsspanning. De vervuiling van de isolatie stelt daarbij een onderste grens. Men is erin geslaagd om de schakeloverspanningen drastisch te beperken tot beneden het anderhalfvoud van de bedrijfsspanning door bijzondere voorzieningen aan de vermogensschakelaars aan te brengen; het is zelfs niet uitgesloten dat — waar de principes tot een nog verdergaande verlaging bekend zijn [1] — de schakeloverspanningen zo drastisch teruggebracht kunnen worden dat zij geen doorslaggevend criterium voor de isolatiesterkte meer zullen vormen.



afb. 1 - Vergelijking van het oorspronkelijke en het uiteindelijke ontwerp van een portaalconstructie in het 1150 kV Waltz-Mill-project.

(Uit de Proceedings of the American Power Conference 1968, Vol. 30 "Insulation Coordination of the 1100 kV-Waltz Millstation J. P. Mc Kimon, A. R. Haleman en J. K. Dillard).

Dat dergelijke criteria een zeer grote invloed uitoefenen op de afmetingen van bovengrondse hoogspanningsconstructies moge blijken uit afb. 1, waarin het oorspronkelijke en het definitieve ontwerp van een portaalconstructie voor het 1100 kV Waltz-Mill-proefstation zijn weergegeven. Het definitieve ontwerp verschilt van het oorspronkelijke doordat (ogenschijnlijk slechts onbetekende) veranderingen in de aanvankelijk gehanteerde grondslagen werden aangebracht, hetgeen in besparingen van 30 tot 60 % in isolatie en afstanden resulteerde<sup>1)</sup>. Isolatorlengten van omstreeks 10 m zullen echter bij 1100 kV, onafhankelijk van de vervuilingsgraad, zeker vereist zijn.

<sup>1)</sup> Men kan een dergelijk geminimaliseerd ontwerp niet als een praktijkvoorbeeld voor ons land beschouwen. Het betreft hier een proefstation, waarvoor geheel andere veiligheidscriteria gelden dan in werkelijkheid in een bewoonde omgeving vereist zouden zijn; bovendien ligt het Waltz-Mill station in een niet-vervuilde omgeving waar de eisen inzake de isolatievervuiling op ongeveer 60% van de gemiddelde in Nederland gebruikelijke waarden liggen.

Om aan de coronaverschijnselen paal en perk te stellen zal het nodig zijn dikke draden in meervoudige bundeluitvoering toe te passen: zo worden in Waltz-Mill bundels van 6 geleiders met een diameter van ongeveer 5 cm toegepast; bij 1500 kV zullen waarschijnlijk bundels van 8 geleiders nodig zijn.

Er bestaan geen problemen voor wat betreft de fabricage van staalaluminium geleiders tot een dikte van ca. 7,5 cm. De stroombelastbaarheid zal dan ook bij deze hoge spanningen niet door de lijnen worden bepaald, maar door de in de stations opgestelde apparatuur zoals vermogensschakelaars, waarvan de toelaatbare stroomsterkte thans ongeveer 4 kA bedraagt. Dit zou bij 1100, resp. 1500 kV overeenkomen met een toelaatbaar transportvermogen van ca. 7500, resp. 10.000 MW per circuit. Dit zijn al zulke enorme vermogens, dat er althans in de beginperiode van de toepassing van deze spanningen vrijwel geen vraag zal zijn naar nog zwaardere schakelapparatuur. Indien de behoefte daaraan toch zou ontstaan, dan zijn er geen principiële onoverkomelijkheden te verwachten.

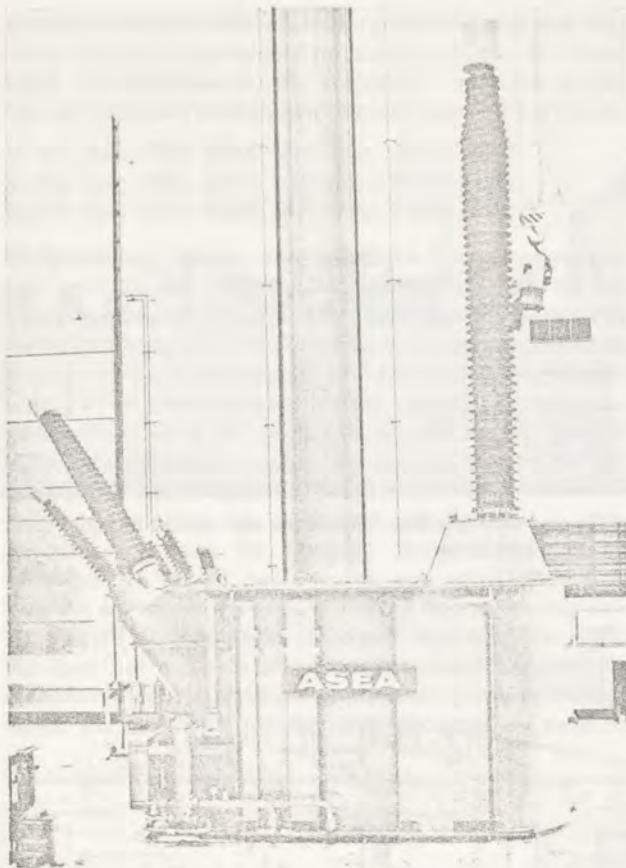
De te verwachten mastconstructies zullen zeker, niet-tegenstaande hun enorme afmetingen en gewicht, binnen het bereik van ontwerpers en constructeurs liggen. De meest lichte en dientengevolge ijle en in het landschap minst storende mastconstructie wordt ongetwijfeld verkregen door enkelcircuit-lijnen toe te passen. Dit is in uitgestrekte landen zoals de Verenigde Staten, Canada, Zweden en Finland reeds nu een heel normale praktijk, in tegenstelling tot die landen waar mogelijke tracé's schaars zijn en derhalve, om een zo groot mogelijke benutting van de ter beschikking staande gronden te verkrijgen, dubbel- of meercircuit verbindingen worden gemaakt (Nederland, Duitsland, Engeland).

De thans aan de gang zijnde onderzoeken beperken zich voornamelijk tot enkelcircuitverbindingen; over verbindingen met twee circuits aan een mast en over verbindingen met eventueel nog hogere spanningen dan de thans onderzochte is nog weinig bekend. Wel is door C. Gary in het onderzoekcentrum Les Renardières van de Electricité de France een poging gedaan om de afmetingen van een 2000 kV-lijn te bepalen. Hij kwam tot minimale overslagafstanden van 20 m, kleinste afstanden van de draden tot de grond van 30 m. Met mastafstanden van 700 m zou de ophanghoogte 85 m bedragen; de masten zouden meer dan 100 m hoog en 110 m breed dienen te worden [2].

Onder deskundigen uit de internationale wereld van de elektriciteitsvoorziening bestaat er weinig twijfel over dat de voor transmissiespanningen van 1100 en 1500 kV benodigde apparatuur en constructies kunnen worden gerealiseerd. Veel moeite en geld worden geïnvesteerd in laboratoria en proefstations om de nog resterende vraagstukken te onderzoeken (afb. 2); het zal echter wel nog geruime tijd duren voordat de eerste verbindingen voor spanningen in het megavoltgebied operationeel zullen zijn. De eerste 1100 kV en 1500 kV lijnen worden omstreeks 1980 verwacht, ondermeer in de Verenigde Staten en Canada.

Bestaat er dus weinig twijfel over de oplossing van de technische vraagstukken bij de hiervoor genoemde spanningen, een veel grotere zorg vormen de niet-technische problemen die hierbij een rol zullen gaan





afb. 2 - Hoogspanningstransformator 333 MVA, 1500 kV, voor beproeving van apparatuur; om een indruk te krijgen van de afmetingen lette men op de man in de kraanstoel. (Foto ASEA).

spelen. De voornaamste vraag zal niet zijn wat technisch gezien gebouwd kan worden, maar wat wij allen als gemeenschap als toelaatbaar zullen aanvaarden vanuit het oogpunt van milieuzorg. Al is de opstelling tegenover milieuproblemen natuurlijk van land tot land verschillend, in het algemeen kan worden gesteld dat de publieke opinie van groeiende betekenis wordt bij het ontwerp van produktie- en transmissiesystemen.

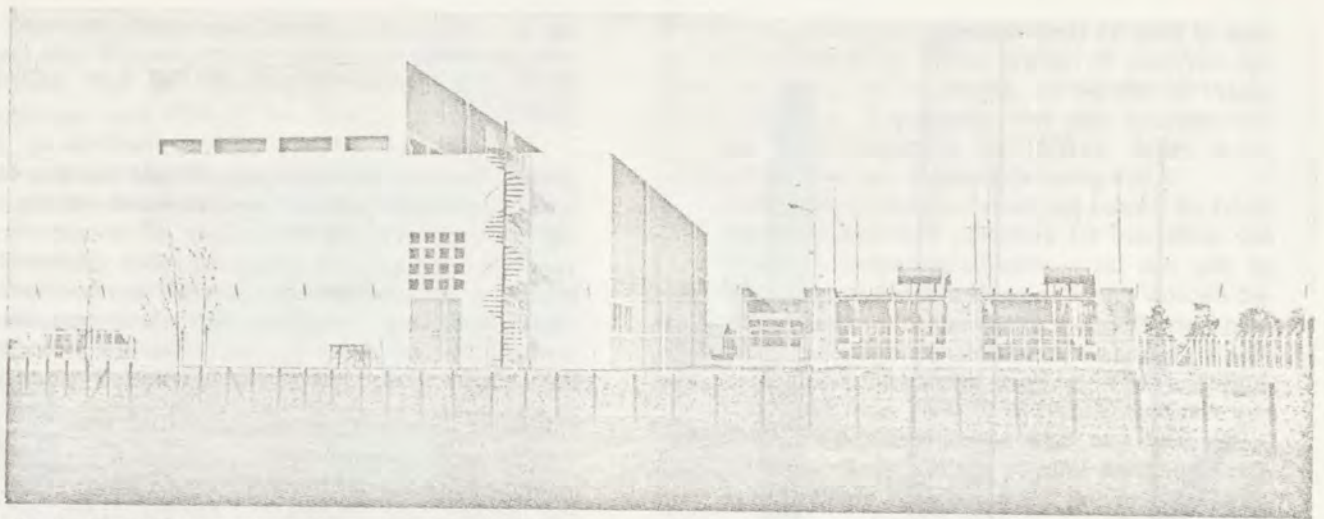
Het is in dit opzicht belangwekkend dat door de Central Electricity Generating Board (C.E.G.B.) in Engeland — waar de geografische omstandigheden niet veel van die in Nederland afwijken — het bestaande 400 kV-transmissiesysteem voldoende wordt geacht voor een totale landelijke belasting van op z'n minst 110.000 MW.

Men is van mening dat, indien methoden ontwikkeld worden om kernenergiecentrales op te stellen in of dichtbij grote afnamecentra, er in Engeland mogelijk geen behoefte bestaat aan meer dan 400 kV. Daarbij zal de toepassing van volledig gesloten schakelstations (afb. 3, 4 en 5), zoals die ook hier te lande worden ontwikkeld, van grote waarde zijn. Cherry's mening

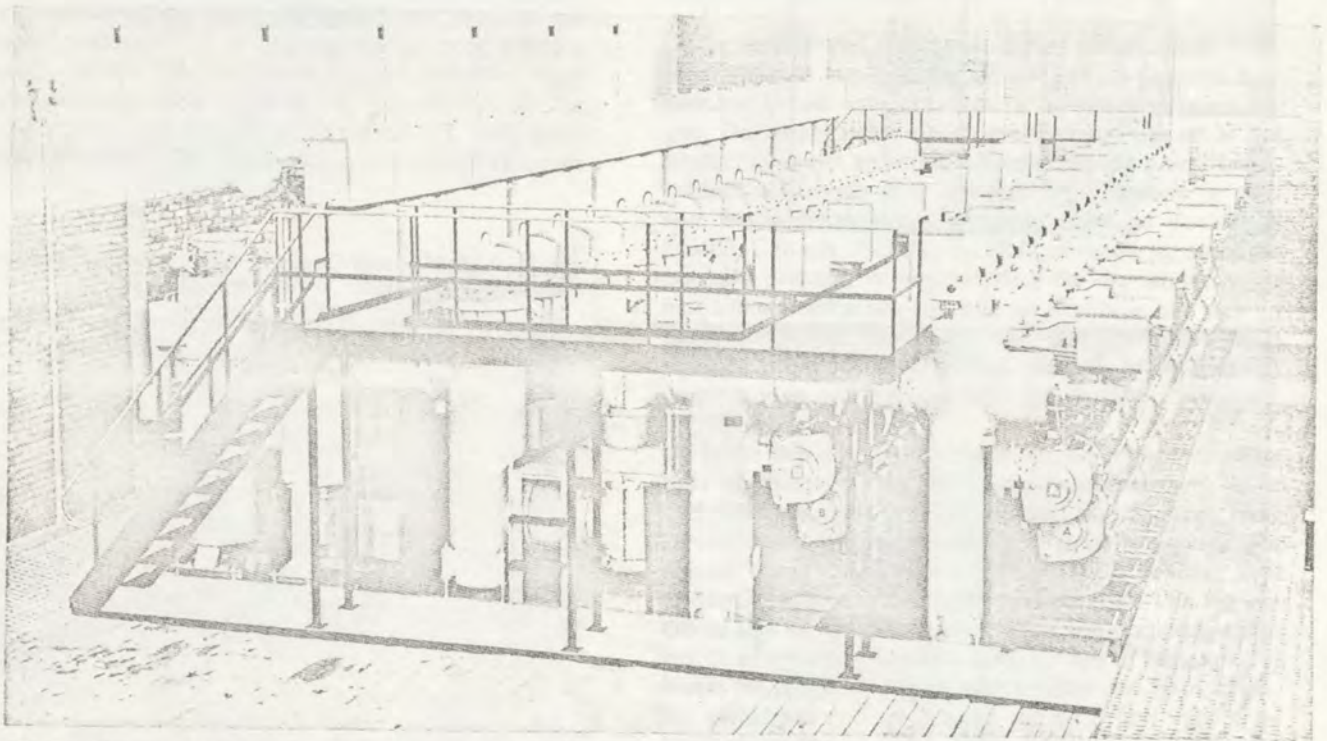
afb. 3 - 150 kV-station Gouda in open bouwwijze; bebouwde oppervlakte ca. 20.000 m<sup>2</sup>. (Foto E.Z.H.).







afb. 4 - 150 kV-station Westerlee, vergelijkbaar met het station Gouda; door gesloten bouwwijze van station en apparatuur be- draagt de bebouwde oppervlakte slechts 2.500 m<sup>2</sup>. (Foto E.Z.H.).



afb. 5 - Het inwendige van het op de voorgaande foto afgebeelde station. (Foto E.Z.H.).

[3] is: „If we have to go beyond 400 kV, then there will be an enormous problem of getting a line down to a tolerance size and it might well be that if the regard for amenity increases, we may find that the pressure will be on more local power stations to reduce the need for transmission.

At the moment this policy is hopelessly uneconomic but in twenty years' time, and it might be 20 years before that decision is forced on us, the picture may be completely different. While it is quite impossible to make any sensible prognostication, my guess is that if we went to, say, 1200 kV, we should have the greatest difficulty in the present temper of the country in persuading anybody to accept a 1200 kV line. And the cost of cabling such lines will be fantastic”.

### III. Vooruitzichten van de bovengrondse transmissie in Nederland

Na een stormachtige ontwikkeling van de elektrificatie in ons land tot de twintiger jaren blijkt dat de vraag naar elektrische energie de laatste vijf decennia gemiddeld eens in de tien jaren is verdubbeld. In de crisis- en oorlogstijd was de toeneming wat geringer, maar daarna werd de gemiddelde jaarlijkse stijging weer aanmerkelijk groter door de bevolkingsaanwas en de steeds toenemende industrialisatie (verdubbelingsperiode circa 8,5 jaar).

In 1970 bedroeg de hoogste landelijke belasting ongeveer 6500 MW. Analoog aan het betoog in hoofdstuk 1



zouden bij een onverminderde toeneming van het verbruik, zoals die gemiddeld de laatste 50 (c.q. 20) jaren heeft plaatsgevonden, de volgende landelijke (afgeronde) *maximale belastingen* kunnen worden verwacht:

in het jaar 1980 13000 MW (c.q. 15000 MW);  
 in the jaar 1990 26000 MW (c.q. 35000 MW);  
 in het jaar 2000 52000 MW (c.q. 80000 MW).

Welke invloed zou nu een dergelijke belastingsontwikkeling in de drie vóór ons liggende decennia op het transmissiesysteem t.a.v. het spanningsniveau en het transportvermogen hebben? Om daarvan een beeld te kunnen vormen baseren wij ons op de huidige ontwikkeling in de internationale wereld van de elektriciteitsvoorziening. Niet te voorziene revolutionaire technische ontwikkelingen zullen wij daarbij niet in de beschouwing betrekken.

Indien de tendens van de laatste vijf decennia — een verdubbeling van de hoogste transmissiespanning eens per 25 tot 30 jaar — zich zou voortzetten dan kunnen wij tegen de eeuwwisseling een spanning van ca. 760 kV en omstreeks 2025 een spanning van 1500 kV voor het massale elektriciteitstransport tegemoet zien. Deze data zouden bij een belastingsverdubbeling, zoals die zich in de laatste twee decennia — eens in

de 8,5 jaar — heeft voorgedaan, ongeveer vijf jaar eerder vallen.

Een andere beschouwingwijze brengt ons tot dezelfde gevolgtrekking: de grootste vermogens van de opwekeenheden, opgesteld in de jaren waarin de laatste twee spanningsniveaus van 150 kV en 380 kV werden ingevoerd, bedroegen globaal 40 MW, resp. 400 MW. Een verhouding van 1 : 10. Dit nu is vrijwel dezelfde verhouding als die tussen de natuurlijke vermogens bij beide spanningen (60 en 600 MW); het natuurlijk vermogen van een circuit lag dus ca. 50 % hoger dan het vermogen van de vrijwel te zelfde tijd in het land opgestelde grootste turbogenerator. Vanzelfsprekend geeft de mogelijkheid om meer vermogen over te brengen een stimulans tot het opstellen van navenant grotere produktie-eenheden.

Deze correlatie, gecombineerd met de bestaande wens van de elektriciteitsbedrijven om de maximale machinegrootte om veiligheidsredenen omstreeks 5 % van de landelijke maximale belasting te doen zijn, kan nu als werkhypothese dienst doen om spanningsniveau en tijdstip van invoering wat nauwkeuriger te bepalen.

Men komt bij een 10 (resp. 8,5) -jaarlijkse verdubbingsperiode van de maximale belasting tot de volgende resultaten:

Jaar	landelijke belasting (MW)	maximaal machinevermogen (MW)	natuurlijk vermogen (= 1/2 x machinevermogen) (MW)	transmissiespanning (kV)
1980	13000 (15000)	650 ( 750)	975 (1125)	500 ( 600)
1990	26000 (35000)	1300 (1750)	1950 (2625)	700 ( 850)
2000	52000 (80000)	2600 (4000)	3900 (6000)	1000 (1250)

Men trekke hieruit vooral niet de conclusie dat met de introductie van een hoger spanningsniveau het grotere eenheidsvermogen van generatoren ter beschikking zou moeten staan. Wel dat, indien ze gefabriceerd zouden kunnen worden, ze ook inderdaad toepassing zouden vinden. Overigens zijn op dit ogenblik eenheden van 1500 tot 2000 MW reeds in studie genomen.

De spanningswaarden die hierboven naar voren kwamen zijn nu geen van alle internationaal geaccepteerd, laat staan genormaliseerd; geen van deze spanningen maakt zelfs deel uit van de (soms verhitte) discussies over dit onderwerp.

Wel wordt, zoals eerder vermeld, 750... 800 kV in sommige landen (Canada, USA, USSR) op bescheiden schaal toegepast, maar algemeen vindt men de stap van 380 kV naar 750... 800 kV te gering om economisch verantwoord te zijn. De thans ernstig overwogen spanningen zijn 1100 kV en 1500 kV, terwijl sommigen 2000 kV haalbaar achten.

Verscheidene landen w.o. Zweden, Italië en Frankrijk hebben echter ernstig overwogen om 750 kV toe te passen (een spanning die bij ons eventueel na 1990 noodzakelijk zou worden). Deze plannen zijn o.m. in Zweden nog steeds niet geheel losgelaten. Zodra echter de noodzakelijke internationale koppelingen mede in de beschouwingen worden betrokken, acht men ook in die kringen de keuze van een 750 kV-niveau een te kleine stap om de toch altijd zeer hoge kosten, die met

de invoering van een nieuwe transmissiespanning gepaard gaan, te rechtvaardigen. In West-Europa als samenhangend geheel wordt als volgende stap 1100 kV dan ook het meest waarschijnlijk geacht. (In zeer uitgestrekte gebieden zoals Canada en de V.S. 1500 kV of misschien zelfs 2000 kV.)

Alhoewel het natuurlijk niet onmogelijk — maar terwille van koppelingen met het buitenland wel hoogst onwaarschijnlijk — is dat Nederland van deze gedragslijn zou afwijken, nemen wij aan dat het eerstvolgende spanningsniveau in ons land 1100 kV zal zijn; deze transmissiespanning zou in Nederland eerst omstreeks de eeuwwisseling verwacht behoeven te worden.

Nu kan het om andere dan zuiver technisch-economische redenen, bijv. esthetische, nodig worden geacht om eerder op een hoger spanningsniveau over te gaan; dit moge blijken uit een studie die de Electricité de France heeft gemaakt over de 380 kV-lijnen die in het jaar 2000 nodig zouden worden bij een vrije en bij een gebonden verdeling van de produktiecentra.

Bij een vrije verdeling of plaatskeuze zouden de produktie-eenheden nabij de afnamecentra worden opgesteld, een mogelijkheid die hoe langer hoe schaarser wordt, vooral door het tekort aan koelwater in het binnenland. Opstelling van produktie-eenheden langs de kust, waar voldoende koelmogelijkheden zijn, is een voorbeeld van gebonden plaatskeuze voor de produktie. De Calbiac en Augé [4], hebben uitgerekend dat in het laatste geval in het jaar 2000 twintig enkel-



circuit 380 kV-lijnen tussen Parijs en Le Havre nodig zouden zijn en 19 van Parijs naar Lille; het is duidelijk, dat dergelijke mastbossen in elk landschap volkomen ontoelaatbaar zijn. Bij een volkomen vrije plaatskeuze voor produktie-eenheden zou daarentegen het bestaande Franse 380 kV-net nog vrijwel in zijn huidige vorm gehandhaafd kunnen worden (enkele onbelangrijke uitbreidingen daargelaten). Men staat dan ook voor de keus om zoveel mogelijk een vrije distributie van de produktiemiddelen na te streven of, als dat niet meer kan of mag, een aanzienlijk hogere transmissiespanning te kiezen. Zonder ons verder in deze kwestie te verdiepen (zie ook hoofdstuk 1), kan nog wel de vraag worden gesteld wanneer een spanning van 1100 kV uit economisch oogpunt acceptabel zou zijn.

Uit een theoretische studie van Paris [5], waarvan de conclusies door de resultaten van een internationale enquête door Wood [6] werden bevestigd, kan men verwachten dat een 1100 kV-lijn ongeveer  $4 \times$  zoveel zal gaan kosten als een 380 kV-verbinding van dezelfde lengte. Indien aangenomen wordt dat ten naaste bij dezelfde afstanden in het geding zullen zijn en dat voorts alle kostprijsfactoren van elektriciteit onderling een ongewijzigde verhouding te zien zullen geven, zou men hieruit kunnen opmaken dat de introductie van een 1100 kV-net, afhankelijk van de groei van de vraag naar elektriciteit, tussen 1985 en 1990 voor ons land betaalbaar zou worden.

Een iets vroeger tijdstip is zelfs mogelijk omdat de technisch meest economische overdracht van vermogen (natuurlijk vermogen) kwadratisch met de spanning stijgt en de transmissiekosten per kWh derhalve een relatief dalende tendens zullen vertonen.

De voorgaande beschouwingen leiden tot de conclusie dat — indien de vraag naar elektriciteit niet onverwacht drastisch zou dalen — in Nederland omstreeks de eeuwwisseling een 1100 kV-transmissienet zal moeten worden opgebouwd. In het onwaarschijnlijke geval dat een 700 . . . 800 kV transmissiespanning zou worden gekozen wordt het tijdstip van invoering met een tiental jaren vervroegd.

Men kan zich afvragen, of de aanwezigheid van dergelijke toekomstige bovengrondse lijnen geen onaantoonbare aanslag op het ons nog resterende landschapsschoon zal gaan vormen. Daarop wordt ingegaan in hoofdstuk 5.

Wel kan worden opgemerkt dat de in beslag genomen grondoppervlakte (de zakelijk rechtstrook; zie afb. 1b, Hoofdstuk 2) bij hogere spanningen voor eenzelfde vermogenstransport aanmerkelijk kleiner is dan bij een veelheid van verbindingen van lager spanningsniveau. Zo beslaan de stroken van een dubbelcircuitlijn van 150, 380 en 750 kV breedten van ongeveer 50, 75 en 105 m (voor hogere spanningen is dit nog niet met zekerheid te zeggen); de verhouding tussen de technisch meest aantrekkelijke transportmogelijkheden bedraagt ongeveer 1 : 7 : 25.

Zo bezien is de keuze niet moeilijk, al is de werkelijkheid iets ingewikkelder. Men moet immers de grote hoeveelheden energie die in een groot hoofdstation worden aangevoerd ook nog verdelen en dat vergt weer transmissielijnen van lagere spanning (distributielijnen). Dergelijke lijnen zijn echter veelal wel aanwezig op bepaalde punten waar ze voorheen als transmissielijnen samenkwamen, om op een lager spanningsniveau in de toen mindere behoefte van hetzelfde verbruikscentrum te voorzien. Op deze wijze heeft bij

de invoering van een hoger spanningsniveau een vrijwel automatische degradatie plaats van het bestaande transmissienet tot distributienet. Het 150 kV-net van Zuid-Holland, dat oorspronkelijk als koppelnet was opgezet, heeft tegenwoordig vrijwel uitsluitend een distribuerende functie.

Aan de meerdere vraag zal men indien mogelijk bovengronds en, indien dit onmogelijk is, d.m.v. grondkabel voldoen. Dit kan in dichtbevolkte centra meestal wel plaatsvinden omdat een grote mate van compensatie van de laadstroom kan optreden door de meerdere vraag naar inductief vermogen.

Men dient overigens de praktische problemen die optreden indien tot het aanleggen van kabels wordt overgegaan, niet gering te schatten. Voor 150 kV zijn voor een dubbelcircuit enkele meters nodig; bij 380 kV reeds 10 tot 15 meter voor een zware verbinding. Dat is dus wel aanzienlijk minder dan voor een bovengrondse verbinding nodig is, maar toch altijd nog zoveel, dat indien de in verband met inductiestromen aan te houden afstand tot telefoonkabels en metalen gas- en waterleidingen erbij gerekend wordt, men zeker niet in elke straat of weg transmissiekabels kan wegwerken. Te meer waar vele wegen reeds volbezet zijn met andere obstakels, zoals laagspanningskabels en rioleringen.

De onvoorspelbare complexiteit van het transmissievraagstuk maakt het uitermate moeilijk om over de toekomst van het bovengrondse transport in Nederland veel meer te zeggen, doch ik hoop toch enige indruk van de voor ons liggende vraagstukken op dit gebied te hebben gegeven.

Anders dan ten aanzien van de schaalvergroting bij produktie-eenheden het geval is, valt hier geen nauwkeurige analytische prognose te geven, omdat het niet mogelijk is de configuratie en het ontwerp van een transmissiesysteem voor de toekomst te bepalen zonder de vestigingsplaatsen van nieuwe produktie-eenheden en andere essentiële gegevens te kennen [7].

## Literatuur verwijzing

1. Köppl und Ruoss. Schaltüberspannungen in Hoch- und Höchstspannungsnetzen. *Brown Boveri Mitt.* 12 (1970) 554.
2. C. Gary. E.d.F. Verslag discussie gr. 32 CIGRE 1970 (extr. El. Review 18 September 1970).
3. D. M. Cherry. Director General Transmission Development and Construction Division: Central Electricity Generating Board: IEE meeting CERN — Leatherhead. (*Electrical Times* 16 April 1971 p. 38 en *Electrical Review* 16 April 1971.)
4. J. de Calbiac en J. Augé. Verslag discussie gr. 32 CIGRE 1970.
5. L. Paris. The future of UHV—transmission lines. *IEEE Spectrum* September 1969.
6. A. B. Wood. Cost Trends and Special Problems of UHV.—Overhead Lines. CIGRE studiecmissie 22 1971 (SC)08.
7. Suilin Ling. Economics of Scale in the Steam-Electric Power Generating Industry p. 81 e.v. North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1964.



## Hoofdstuk 4. Ondergrondse transmissiesystemen, nu en in de toekomst

door drs. M. C. Lelie

### Summary

*The main technical aspects of high power underground transmission are reviewed.*

*For the time being the conventional oil filled cable is the preferential type for most transmission lines with circuits up to 1200 MW. In this country for the next two or three decades transmission capacities above 1200 MW and working voltages above 380 kV are not to be expected; therefore no immediate need exists to find a substitute for the oil-filled cables.*

*If voltages above 380 kV are needed it will be necessary to replace the insulating paper in oil-filled cable by synthetic material with a very low loss factor.*

*The spacer cable — a coaxial cable with a compressed gas as insulation — offers attractive possibilities for transmission of power above 1200 MW at voltages of 380 kV and higher. The spacer cable may even retard the application of cryogenic (or superconducting) cable.*

### I. Enkele technische aspecten van ondergrondse transmissie

In dit hoofdstuk wordt — tenzij anders vermeld — uitsluitend gesproken over driefasige wisselspanningsnetten waarbij iedere fase in een afzonderlijke kabel is ondergebracht.

#### A. Algemene beschrijving van de opbouw van een kabel

In alle hier te bespreken enkel-aderige kabels bevindt zich centraal de *geleider*, die uit aluminium of koper kan bestaan; deze geleider staat op een zekere spanning t.o.v. de omringende aarde: de fase-spanning. Dit is slechts mogelijk wanneer de geleider voldoende geïsoleerd is. De *isolatie* kan — al naar gelang van het kabeltype — verschillend zijn opgebouwd. Bij de oliedrukkabel van afb. 1 bestaat de isolatie uit in een groot aantal lagen om de geleider aangebracht papier, gedrenkt in dunne olie die onder druk wordt gehouden.

Aan de buitenzijde der isolatie vindt men vaak een geleidend *scherm*, dat op dezelfde spanning als de aarde wordt gehouden. De kabel wordt ingesloten in een *mantel*, die in de meeste gevallen uit metaal bestaat (lood of aluminium) en door een *staalbewapening* versterkt kan zijn. Door speciale lagen (bijv. een kunststofmantel) wordt de kabel tegen corrosie beschermd.

**afb. 1** - Opengewerkt model van een oliedrukkabel voor een spanning van 380 kV. De kopergeleider is opgebouwd uit 6 sectoren, bijeengehouden door een bandage van lagen koolpapier en metaalband, inwendig (in het oliekanal) ondersteund door een staalspiraal. Om de geleider ligt de uit enkele honderden lagen papier opgebouwde papierisolatie. De isolatie is omgeven door een scherm van geperforeerd, met aluminiumfolie bedekt papier; het geheel is ingesloten in een loodmantel. De kabel is geïmpregneerd met dunne olie. (Foto N.K.F.).





## B. Overeenkomst en verschil tussen kabels en bovengrondse lijnen

De kabel en de daarmee corresponderende fase van het bovengrondse net stemmen hierin overeen dat de geleider op hoogspanningsniveau t.o.v. aarde geïsoleerd is. In beide gevallen treden warmteverliezen op die naar de omgeving moeten worden afgevoerd.

Bij de bovengrondse lijn bestaat de isolatie eenvoudig uit de omringende lucht. Bij atmosferische druk is dit een zwakke isolatie; men moet daarom grote afstanden aanhouden; door deze vrije ophanging vormt de warmteafvoer geen probleem. De *stroombelastbaarheid* is groot, d.w.z. per mm<sup>2</sup> van de geleider doorsnede kan een hoge stroomsterkte worden toegestaan.

Bij een kabel streeft men naar een zo compact mogelijke opbouw ten einde de kosten laag te houden; dit stelt hoge eisen aan de isolatie. De warmteafvoer is is niet zo goed als die bij de bovengrondse lijn.

## C. Factoren die de transportcapaciteit bepalen

De transportcapaciteit van een transmissiesysteem wordt gegeven door het produkt van de *bedrijfsspanning* en de *maximaal toelaatbare stroomsterkte* (stroombelastbaarheid). Ter verhoging van de transportcapaciteit kan men dus twee wegen betreden:

- verhoging van de bedrijfsspanning;
- verhoging van de stroombelastbaarheid.

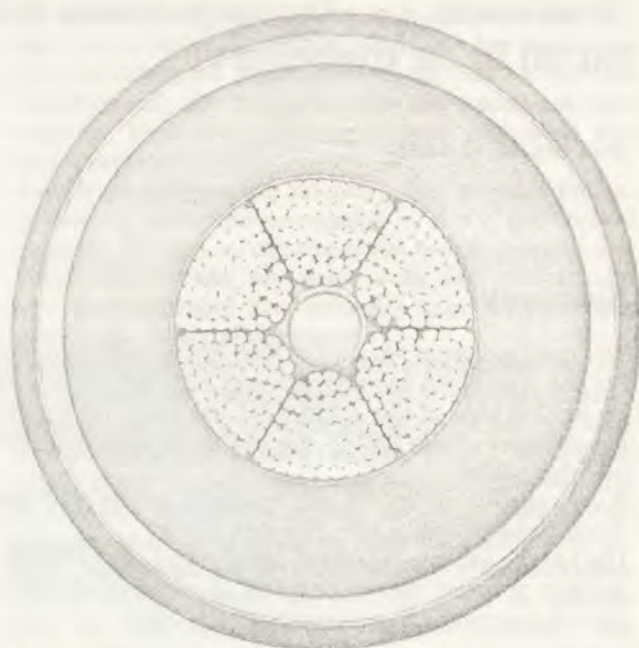
Verhoging van de bedrijfsspanning zal alleen overwogen worden wanneer het de aanleg van een geheel nieuw net betreft; voor het wegwerken van een knelpunt in een bestaand net blijft meestal niets anders over dan de stroombelastbaarheid te verhogen.

De stroombelastbaarheid wordt bepaald door de *hoogste temperatuur* die blijvend in de kabel kan worden toegelaten. Aangezien deze temperatuur mede bepaald wordt door het gevaar van uitdrogen van de bodem (zie blz. 29), kan de bedrijfstemperatuur van de kabel slechts in betrekkelijk geringe mate worden beïnvloed door het wijzigen van de kabelconstructie. De bedrijfstemperatuur van de kabel wordt gegeven door het produkt van de tijdens het bedrijf optredende *warmteverliezen* en de *thermische weerstand*, die bij de afvoer van deze warmte naar de omgeving moet worden overwonnen.

Men zal dus ter verhoging van de transportcapaciteit trachten de warmteverliezen te beperken en de warmteafvoer te bevorderen.

### Warmteverliezen t.g.v. de stroom

De warmteverliezen komen voor een belangrijk deel voor rekening van de *elektrische weerstand van de geleider*. Vergroting van de stroombelastbaarheid door verkleining van de warmteverliezen is mogelijk door de weerstand van de geleider te verlagen, bijv. door de doorsnede te vergroten. Men ziet in de loop van de tijd steeds zwaardere geleiderdoorsneden verschijnen: eerst 400 mm<sup>2</sup>, dan 800 mm<sup>2</sup> en tenslotte zelfs 2000 mm<sup>2</sup>. Bij wisselstroom heeft men bovendien nog te maken met het *huid- of skin-effect*: de stroom verdeelt zich niet regelmatig over de geleider, maar vertoont een voorkeur voor de buitenkant. Dit leidt tot een vergroting van de geleiderweerstand en dus tot hogere verliezen; door speciale geleiderconstructies (afb. 2)



afb. 2 - Loodrechte doorsnede van de sector-geleider uit afb. 1. De sectorvormige opbouw dient om het skin-effect tegen te gaan, d.w.z. om de stroom zo gelijkmatig mogelijk over de kabeldoorsnede te verdelen. Hierdoor wordt de stroombelastbaarheid van de kabel vergroot. (Foto N.K.F.).

kan dit effect echter naar behoren onderdrukt worden. De stroom in de geleider kan in de metalen mantel en in de mantels van naburige kabels stromen induceren die aanleiding geven tot *mantelverliezen*; is een staalbewapening aanwezig, dan kunnen daarin magnetische verliezen optreden.

### Warmteverliezen t.g.v. spanning (isolatieverliezen)

Door periodieke verschuivingen van de elektrische ladingen in de isolatie kunnen bij hoge wisselspanningen aanzienlijke isolatieverliezen optreden; deze zijn alleen van de spanning afhankelijk, zij treden dus ook op wanneer de geleider nog geen stroom voert.

De isolatieverliezen worden, behalve door vorm en afmetingen van de isolatie, bepaald door het kwadraat van de spanning; verdubbelt men onder overigens dezelfde omstandigheden de spanning, dan nemen de verliezen tot het viervoudige toe; zij worden dus vooral bij hoge spanningen van betekenis. Bij verhoging van de bedrijfsspanning gaat een deel van de daardoor verkregen toename van de transportcapaciteit verloren omdat de isolatieverliezen ten koste van de stroombelastbaarheid toenemen. Boven een bepaalde spanning gaat de transportcapaciteit zelfs afnemen (zie hiervoor de discussie op blz. 31 en afb. 3).

De isolatieverliezen worden vanzelfsprekend ook door de eigenschappen van het isolatiemateriaal bepaald; dit komt tot uitdrukking in de zgn. *verliesfactor* van het isolatiemateriaal. Men zoekt naar materiaal met een kleine verliesfactor.

### Warmteafvoer

Hiër voor is reeds gewezen op de noodzaak, de thermische weerstand van de warmteafvoer zo laag mogelijk te doen zijn. Bij het berekenen van de thermische weerstand moet ook de warmtegeleiding van de grond in rekening gebracht worden.

De meeste grondsoorten zijn goede warmtegeleiders;



de grond kan echter bij ca. 60° C zo sterk uitdrogen, dat deze bij latere regenval geen water meer opneemt. De thermische weerstand van de grond neemt in dat geval onherstelbaar toe; in verband hiermee geldt de eis dat de buitenkant van de kabel niet warmer mag zijn dan 50° C.

Naburige kabels kunnen elkaars warmteafvoer hinderen; dit is één van de redenen om de kabels ver uit elkaar te houden.

De warmteafvoer kan slechts in geringe mate worden beïnvloed door de kabelconstructie te wijzigen; een drastische verbetering van de warmteafvoer is alleen mogelijk door *geforceerde koeling*.

#### *Stroombelastbaarheid en kabeltemperatuur*

De maximale kabeltemperatuur, die uiteindelijk de belastbaarheid van de kabel vastlegt, wordt bepaald door de volgende eisen:

- er mag geen thermische ontleding of smelten van de isolatie optreden;
- er mag geen gevaar zijn voor thermische doorslag;
- de grond mag niet onherstelbaar uitdrogen.

#### D. Transmissiecapaciteit en capacatieve laadstroom

Zoals reeds in hoofdstuk 2 is opgemerkt gedraagt een kabelcircuit zich altijd als een capacatieve belasting; de daarbij optredende capacatieve laadstroom beperkt het transport van reëel vermogen. Men moet dus onderscheid maken tussen de theoretische transportcapaciteit (geen capacatieve laadstroom) en de werkelijke transportcapaciteit, waarin de invloed van de capacatieve laadstroom verdisconteerd is. De verhouding van de werkelijke en de theoretische transportcapaciteit zou men het 'transportrendement' kunnen noemen; dit neemt af naarmate de kabel langer wordt. De kabellengte waarbij het transportrendement nul wordt (en de kabel a.h.w. dichtslaat) noemt men de 'kritische lengte'; dit begrip brengt echter niet tot uitdrukking tot welke lengte de kabel wél bruikbaar is. Daarom kan men beter een 'bruikbare lengte' definiëren, die aangeeft bij welke kabellengte het transportrendement nog 95 % bedraagt. Zo blijkt bijv. deze bruikbare lengte bij oliedrukkabels 20 à 30 km te zijn; de kritische lengte bedraagt daar (afhankelijk van het type) 60 à 90 km.

Opgemerkt moet worden dat het technisch volledig mogelijk is, elke kabellengte te leggen (zelfs boven de kritische lengte) mits bepaalde voorzieningen worden getroffen, nl. compensatie van de kabelcircuits.

#### *Compensatie van kabelcircuits*

Bij kabelcircuits, korter dan de hierboven gedefinieerde bruikbare lengte, zou men — zuiver vanuit een oogpunt van transportrendement — niet voor capacatief blindvermogen behoeven te compenseren. Men zal echter in bepaalde gevallen om andere redenen al veel eerder tot compensatie willen overgaan, bijv. om instabiliteit van het net te voorkomen (zie ook Hoofdstuk 2).

Men kan hiertoe aan een uiteinde van het net compensatie-smoorspoelen opstellen, dan wel deze smoorspoelen rechtstreeks in de kabelverbinding opnemen. In dit laatste geval kan men overwegen de spoelen op vrij korte afstand van elkaar (bijv. 2 à 4 km) op te stellen,

waardoor de spoelen tot veel kleiner vermogen beperkt kunnen blijven.

Een globale berekening toont aan dat de investeringen in een 380 kV kabelnet met ca. 20 % zullen toenemen; hoewel deze kostenverhoging niet gering is, behoeft dit geen onoverkomelijk bezwaar te zijn om tot ondergrondse verbindingen over te gaan.

#### E. Het waarborgen van de energievoorziening

Wellicht meer dan thans reeds het geval is zal onze toekomstige samenleving verlangen dat de levering van elektriciteit zoveel mogelijk onder alle omstandigheden gewaarborgd is. In verband hiermee is het wenselijk, de verbindinglijn in de vorm van twee parallelle circuits (*dubbelcircuits*), uit te voeren; wanneer één helft hiervan uitvalt (bijv. tengevolge van een storing of bij onderhoudswerkzaamheden) kan de andere helft zonder bezwaar in dienst blijven en zelfs enigszins worden overbelast. Zodoende kan de elektriciteitslevering voor 50 à 75 % worden gewaarborgd. Bij abnormale omstandigheden kan men denken aan het uitvalven van een verbinding t.g.v. bliksem-inslag, kortsluiting e.d. Om uitval zoveel mogelijk te voorkomen worden aan de kabel eisen gesteld die in hoge mate bepalend zijn voor het ontwerp van de kabel; men kan zelfs stellen dat de ontwikkeling van een kabel zich meer instelt op de abnormale, dan op de normale omstandigheden.

Aangezien kabels in de grond worden gelegd zijn zij niet meer zichtbaar; er moet daarom voor gewaakt worden dat zij door werkzaamheden in de grond niet worden beschadigd.

#### F. Ontwikkelen van kabels en garnituren

In verband met de hierboven reeds aangeduide bijzondere eisen, zal een nieuw ontwikkelde kabel tijdens de *typebeproeving* aan spanningen worden onderworpen die aanzienlijk hoger zijn dan de normale bedrijfsspanning. De ruimte waarin de beproeving plaatsvindt moet i.v.m. mogelijke spanningsoverslagen grote afmetingen hebben. Het ontwikkelen van kabels voor zeer hoge spanningen (750 à 1000 kV) betekent in praktisch alle gevallen dat men een nieuw laboratorium van zeer grote afmetingen moet bouwen; de kosten hiervan drukken zwaar op het ontwikkelde product, vooral wanneer daarvan geen massale omzet is te verwachten.

In dit verband moet ook de ontwikkeling van de *garnituren* genoemd worden; hiertoe behoren o.a. de *moffen* die de verbinding vormen tussen de afzonderlijke fabricagelengten, alsmede de *eindsluitingen* die de kabels aan het eind van een circuit op de juiste wijze afsluiten. De fabrikant van de kabel ontwikkelt en levert eveneens de garnituren; er wordt bijna evenveel tijd aan het ontwikkelen van garnituren besteed als aan kabelontwikkelingen. Wegens de naar verhouding kleine omzet drukt de ontwikkeling zwaarder op de kosten van de garnituren; men streeft daarom naar universele garnituren, waardoor het aantal typen beperkt kan worden.

Vooraf bij cryogene kabels (zie blz. 34) stelt het ontwikkelingswerk zeer hoge eisen aan laboratoria en



apparatuur; dit wordt zó kostbaar, dat alleen de aller-grootste bedrijven hieraan kunnen beginnen.

In dit verband is het verheugend dat de kabelindustrie steeds meer tot onderlinge samenwerking bereid zijn bij het ontwikkelen van dergelijke omvangrijke projecten. Daarnaast moet gewezen worden op het belang van overheidssteun, bijv. in de vorm van garantie-subsidies.

## II. Conventionele kabeltypen voor grote vermogens

Bij de in deze paragraaf te bespreken kabeltypen wordt gedacht aan vermogens van minstens 1000 MW per circuit; in verband met de 4000 MW-verbindingen, die in de toekomst nodig zijn, zou men willen komen tot 2000 MW per circuit.

De bespreking beperkt zich niet tot kabeltypen die werkelijk in gebruik zijn, maar strekt zich ook uit tot kabels die nog in ontwikkeling zijn en daarbij de kenmerken van bestaande, conventionele typen behouden (bijv. een oliedrukkabel met synthetisch papier).

### A. Indeling naar de opbouw van de isolatie

Men kan de te behandelen stof op verschillende manieren indelen: men kan bijv. de kabels onderscheiden naar de opbouw van de isolatie: (overwegend) gasvormig of vast.

Kabels met overwegend gasvormige isolatie worden besproken bij de kabels van de toekomst (zie blz. 33). Bij kabels met vaste isolatie kan men nog onderscheid maken tussen een *homogene isolatie* (bijv. de polyaetheenkabel) en een *gelaagde isolatie* (bijv. papierolie); na een korte beschouwing over kabels met homogene isolatie zal de bespreking zich verder beperken tot kabels met gelaagde isolatie.

### B. Homogene isolatie: polyaetheenkabel

Bij kabels met een homogene isolatie bestaat de isolatie uit één enkel materiaal, dat als een massief geheel om de geleider is aangebracht; er is hierbij geen sprake van een gelaagde structuur. Er is nog geen kabel met homogene isolatie ontwikkeld die zonder meer geschikt is voor de hier beschouwde grote vermogens. De belangrijkste vertegenwoordiger van dit kabeltype is de *polyaetheenkabel*, die geleidelijk tot het gebied der hogere spanningen (150 à 200 kV) doordringt. Kabels met homogene isolatie hebben enkele duidelijke voordelen: zij vragen geen bijkomende voorzieningen die een blijvende bewaking noodzakelijk maken (vergelijk: oliedrukkabel).

Polyaetheen heeft enkele goede eigenschappen: een lage verliesfactor en een in beginsel zeer hoge doorslagvastheid; toch zijn er nog grote moeilijkheden te overwinnen voordat deze kabel bij zeer hoge spanningen kan worden gebruikt. Op zichzelf onbetekenende en moeilijk te vermijden foutjes, zoals kleine verontreinigingen en stofjes, kunnen reeds bij betrekkelijk lage spanningen een nog niet volledig begrepen door-

slagmechanisme op gang brengen (boomvorming); na enkele weken of maanden bij normale spanning in bedrijf te zijn geweest kunnen plotseling doorslagen optreden. Voor kabels tot ca. 150 kV wordt de techniek voldoende beheerst om een goede kwaliteit te kunnen verwachten, maar voor kabels van aanzienlijk hogere spanning is dit nog niet het geval. Voor zover nu kan worden voorzien is het niet waarschijnlijk dat de polyaetheenkabel zal worden toegepast voor transmissiesystemen van groot vermogen; vermoedelijk blijft de toepassing beperkt tot distributiesystemen met bedrijfsspanningen tot 150 kV.

### C. Kabel met gelaagde isolatie: oliedrukkabel

Voor kabelverbindingen boven 1000 MW komt op dit ogenblik in ons land nog uitsluitend de oliedrukkabel in aanmerking. Hierbij bestaat de isolatie uit papierwikkelingen, gedrenkt in dunne olie. De olie wordt hierbij voortdurend op een zekere druk gehouden; daartoe is het noodzakelijk dat de olie zoveel mogelijk ongehinderd van en naar de isolatie kan stromen. De ruimte in de holle geleider wordt als oliekanaal gebruikt; de verdere opbouw van deze kabel mag blijken uit afb. 1, die na het bovenstaande en de algemene beschrijving op blz. 27 geen nadere toelichting behoeft. Het *principe* van de oliedrukkabel wordt als volgt beschreven:

Het oliekanaal van de kabel is aan de uiteinden van iedere sectie met een *expansievat* verbonden; hierin bevinden zich met samengeperste lucht gevulde druk-elementen die elastisch kunnen uitzetten en inkrimpen. Wanneer nu de kabel tijdens het bedrijf warm wordt zet de olie sterker uit dan de andere componenten van de kabel; de zich uitzettende olie vindt gemakkelijk haar weg naar het oliekanaal in de geleider. Als gevolg van de toenemende oliedruk worden de druk-elementen enigszins samengedrukt; er komt ruimte vrij om de uitgezette olie op te vangen; bij afkoelen van de kabel verloopt ditzelfde proces in omgekeerde richting. Door een goede constructie van de expansievaten en een juiste dimensionering van het oliekanaal kan worden bereikt dat de oliedruk in de kabel (ook bij extreme stroomdoorgangen zoals tijdens kortsluitingen) binnen de grenzen van het toelaatbare blijft. Bij het uitzetten van de olie mag de kabel zelf niet vervormd worden; bij het inkrimpen mogen in de isolatie geen holten ontstaan waarin elektrische ontladingen op den duur tot doorslag zouden leiden. Bij horizontale kabels is een geringe oliedruk (ca. 1 ato.) reeds voldoende om dit 'ademen' van de kabel tijdens warmtecycli goed te doen functioneren.

Voor verdere bijzonderheden zij verwezen naar de verschillende afbeeldingen, waarvan de onderschriften voor zichzelf spreken.

#### *Belastbaarheid van de oliedrukkabel*

Bij het spreken over de belastbaarheid van de oliedrukkabel dient men te bedenken dat hiervoor feitelijk geen vaste grenzen kunnen worden aangegeven. Men kan de belastbaarheid vergroten door bijv. een grotere geleider te kiezen of de afstand tussen de fasen te vergroten; leidt dit tot zodanige vergroting van de investeringen dat hetzelfde vermogen tegen lagere kosten met een ander kabeltype kan worden getransporteerd, dan wordt de belastbaarheid door economi-



sche overwegingen bepaald. Spelen echter bijzondere factoren een rol, bijv. ruimtegebrek, of moet men over een betrekkelijk korte afstand een knelpunt in het systeem overbruggen, dan kan het gewenst zijn de belastbaarheid van de kabel door toepassing van bijzondere middelen te vergroten. Men moet daarbij per geval de kosten van een mogelijke oplossing afwegen tegen die van eventuele alternatieve oplossingen.

De in tabel 1 opgenomen waarden geven niettemin een vrij betrouwbare indruk van de transportcapaciteit per 3-fasen circuit, die met de zwaarste op het ogenblik verkrijgbare geleider kan worden gerealiseerd (2000 mm<sup>2</sup> kopergeleider).

Tabel 1. Transportcapaciteiten.

spanning (kV)	geleiderdoorsnede (mm <sup>2</sup> )	grootste stroomsterkte (A)	transmissiecapaciteit *) (MW)
150	2000	2000	500
380	2000	1800	1200

\*) per circuit van 3 fasen.

Voor transporten van 3000 à 4000 MW is dit aan de lage kant: in een 380 kV net heeft men daartoe minstens 3 circuits nodig. Men ziet uit de tabel eveneens dat de maximaal toelaatbare stroomsterkte bij verhoging van de spanning van 150 kV naar 380 kV afneemt; dit is een gevolg van de vrij hoge verliesfactor van het cellulose-papier, waardoor de isolatieverliezen toenemen ten koste van de stroombelastbaarheid. Zet men (zie afb. 3) de transportcapaciteit voor oliedrukkabel met cellulose-papier grafisch uit tegen de bedrijfsspanning, dan ziet men uit de afbuiging van de grafiek de toenemende invloed van de isolatieverliezen; alleen reeds om deze reden heeft het weinig zin de spanning boven 400 à 500 kV te verhogen: dit heeft ertoe geleid, te zoeken naar een synthetisch materiaal met lage verliesfactor ter vervanging van het cellulose-papier. De overige krommen in de grafiek geven een indruk van wat men op deze manier denkt te kunnen bereiken; dit zal nog nader worden toegelicht. De op blz. 29 i.v.m. de capaciteits laadstroom gedefinieerde bruikbare lengte kan voor oliedrukkabel — uiteraard afhankelijk van het type — gesteld worden op 20 à 30 km; voor de 1 × 2000 mm<sup>2</sup> 380 kV oliedrukkabel uit bovenstaand overzicht vindt men hiervoor een waarde van 23 km.

#### Enkele voor- en nadelen van oliedrukkabel

Ondanks de bovengenoemde beperkingen als gevolg van de vrij hoge verliesfactor van cellulose-papier (eventueel te ondervangen door gebruik van synthetisch materiaal) mag men verwachten dat de oliedrukkabel zich nog lange tijd zal kunnen handhaven.

De kabel is technisch zeer geperfectioneerd en in hoge mate bedrijfszeker; telkens blijkt bij nieuwe ontwikkelingen dat de conventionele oliedrukkabel, zowel voor wat investeringen als exploitatiekosten betreft, tot grote transportcapaciteiten kan blijven concurreren. Het is dan ook begrijpelijk dat dit kabeltype uitgangspunt vormt van nieuwe ontwikkelingen die erop gericht zijn, deze voordelen zolang mogelijk vast te houden.

Als bezwaar kan men aanvoeren dat het benodigde kabelbed en de oliedrukhuisjes vrij veel ruimte vragen. Pogingen om in de kabel zelf een expansie-ruimte te realiseren hebben tot nu toe steeds gefaald; het handhaven van de oliedruk vraagt regelmatig toezicht. In de tegenwoordige uitvoering is de kans op olie-lekken echter zeer gering; de kosten van toezicht en onderhoud behoeven geen bezwaar te zijn.

Tot een vermogen van 2500 MW (d.w.z. een tracé bestaande uit twee circuits, elk van 1200 à 1300 MW) is de oliedrukkabel vooralsnog de aangewezen constructie.

#### D. Oliedrukkabel met synthetisch isolatiemateriaal

Voor bedrijfsspanningen boven 500 kV zijn de conventionele oliedrukkabels niet langer bruikbaar, tenzij het cellulosepapier zou kunnen worden vervangen door een synthetisch materiaal met lagere verliesfactor. Er is echter nog een andere reden te zoeken naar een materiaal ter vervanging van papier:

Bij verhoging van de bedrijfsspanning gaan ook de beproevingsspanningen omhoog; daarbij wrekt zich op den duur het feit dat, als gevolg van bepaalde elektrische eigenschappen van cellulose-papier, de spanning zich binnen de isolatie ongunstig over de componenten papier en olie verdeelt; hierbij worden de elektrische zwakkere olielagen zwaarder belast dan de sterkere papierlagen. De olielagen bepalen dus de uiteindelijke doorslagwaarde.

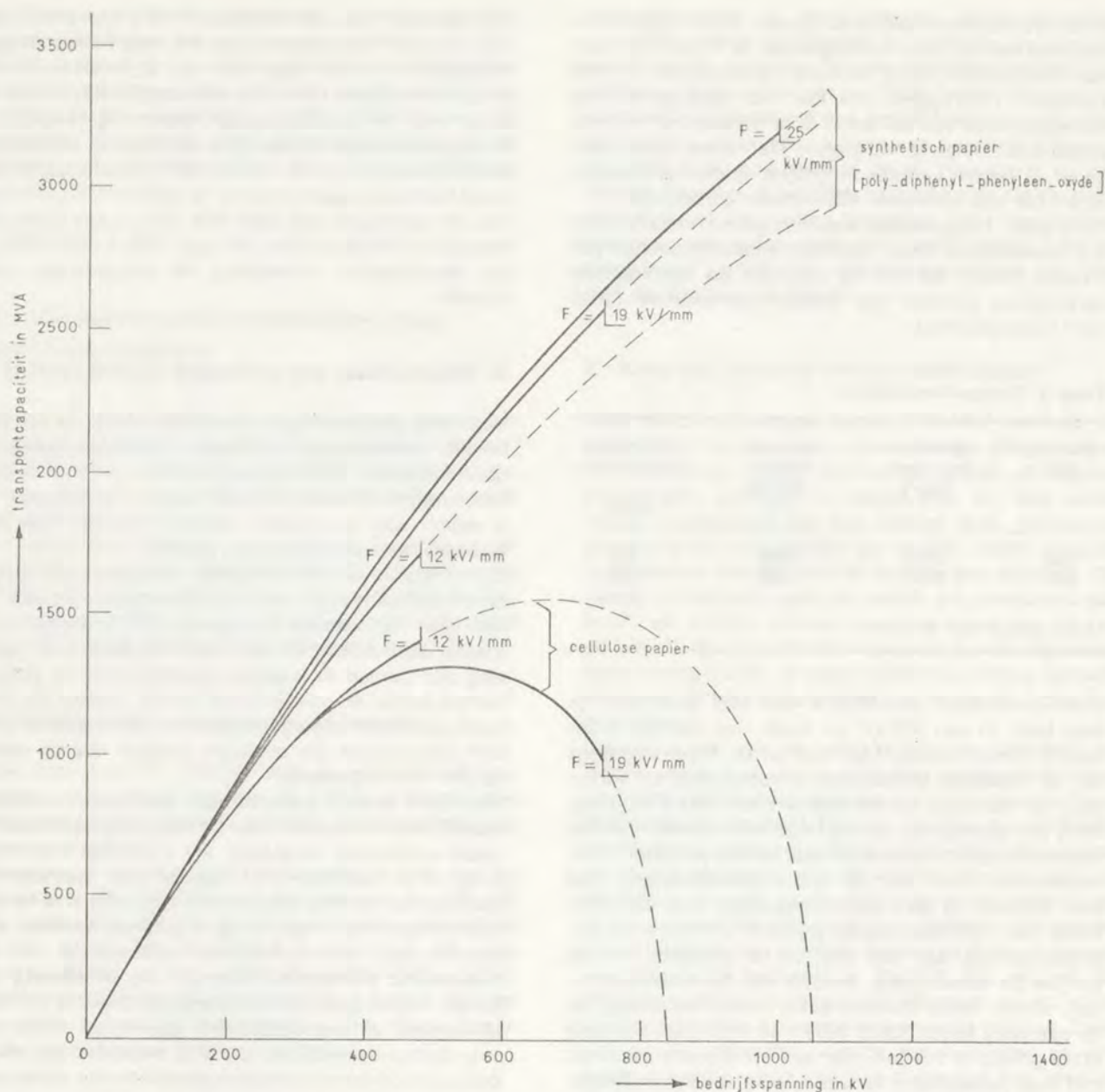
Men heeft daarom gezocht naar synthetisch materiaal waarbij het zwaartepunt van de belasting meer naar de vaste component verschuift. Dit blijkt niet eenvoudig te zijn; het materiaal moet nog aan vele voorwaarden voldoen; het moet oliebestendig zijn, mag niet te snel verouderen, moet een hoog smeltpunt hebben, enz. Feitelijk moet men zich erover verbazen dat een natuurproduct als papier (indertijd vrij willekeurig gekozen) nog zo goed aan al deze eisen blijkt te voldoen. Momenteel is een synthetisch papier op basis van poly-diphenyl-phenyleen oxyde in ontwikkeling; afhankelijk van de bereikbare bedrijfsveldsterkte zullen met dit materiaal geïsoleerde kabels geschikt kunnen zijn voor spanningen aanzienlijk boven 500 kV (zie afb. 3). In principe kan men met een dergelijke isolatie bij 500 kV een vermogen van 1800 MVA, bij 750 kV ruim 2400 MVA en bij 1000 kV zelfs 3000 MVA per circuit bereiken; de 'bruikbare lengte' van deze kabels zal niet wezenlijk verschillen van die van kabels met cellulosepapier.

Indien het waar is dat bij een eventuele verhoging van de bedrijfsspanning het 750 kV-niveau zal worden overgeslagen en het nieuwe niveau bij ca. 1200 kV zal uitkomen, zal het niet eenvoudig zijn hiervoor geschikt isolatiemateriaal in oliedrukkabels te vinden. De 'bruikbare lengte' van kabel met synthetisch papier zal niet wezenlijk verschillen van die van kabel met cellulosepapier.

#### E. Gekoelde kabels

Men kan de stroombelastbaarheid van een kabel verhogen door de warmteverliezen d.m.v. *geforceerde koeling* op meer effectieve wijze af te voeren; hierbij





afb. 3 - (ontleend aan [3]). Grafiek van transportcapaciteit (per 3-fasen circuit) als functie van de bedrijfsspanning voor kabels met cellulose-papier en met synthetisch papier. Bij een gegeven elektrische veldsterkte wordt de hoogst bereikbare bedrijfsspanning bepaald door de grootste kabeldiameter die nog verwerkt kan worden. Het onderbroken getekende deel der krommen geeft aan dat de kabeldiameter daar te groot is.

Bij hoge veldsterkte (d.w.z. bij dunne isolatie) komt men tot een hogere bedrijfsspanning dan bij lage veldsterkte. Echter ziet men dat bij cellulose-papier de isolatieverliezen dan zo groot worden dat de transportcapaciteit boven 600 kV niet meer toeneemt, maar zelfs afneemt. Bij synthetisch papier zijn de isolatieverliezen veel kleiner; men kan dan bij voldoende hoge bedrijfsspanning een transportcapaciteit van 2500 MW en hoger bereiken. De waarde die men uiteindelijk zal kunnen bereiken, hangt af van de papierkwaliteit, die op technische schaal gehandhaafd kan worden en die uiteindelijk de hoogste in de praktijk te hanteren veldsterkte bepaalt.

heeft men de keuze tussen *uitwendige* en *inwendige* koeling.

Uitwendig koelen is, technisch gezien, vrij eenvoudig: men trekt de 3 fasen van het circuit in een gemeenschappelijke buis en pompt daar koelwater door. De verliezen zijn dan wel groot, maar men krijgt een grote ruimtebesparing; men kan natuurlijk ook iedere fase in een eigen buis trekken en door een grotere afstand tussen de fasen de verliezen verminderen.

Inwendige koeling vindt haar toepassing in oliedruk-kabels waarbij men de olie als koelmiddel laat circuleren, bijv. via de oliekanalen van de beide buitenste

kabels in de ene richting en via de middelste kabel weer terug. Technisch leidt dit tot grotere complicaties dan uitwendige koeling, met name in de garnituren.

Door koeling kan men de transportcapaciteit van een circuit aanzienlijk vergroten, bijv. met een factor 2; dit hangt overigens sterk af van de investeringen die men bereid is hiervoor te doen.

Aangezien men zich bij de hier beschouwde koelmethode grote warmteverliezen veroorlooft, moet men bij de exploitatiekosten ook deze verliezen in rekening brengen. Koeling van kabels beperkt zich i.h.a. tot transmissie van grote vermogens over korte afstanden.



## F. Indeling naar de aard der spanning

Men kan de kabels onderscheiden naar de aard der spanning: *wisselspannings-* en *gelijkspanningskabels*. Deze bespreking blijft in hoofdzaak beperkt tot wisselspannings-kabels; er wordt echter de laatste jaren in de literatuur veel gesproken over gelijkspanningstransmissie: dit onderwerp wordt eveneens in dit artikel behandeld.

## G. Gelijkspanningstransmissie

Men heeft uitgebreid studie gemaakt van de techniek van het gelijkrichten van de wisselspanning en het omzetten van gelijkspanning in wisselspanning; dit heeft geleid tot de ontwikkeling van *convertoren*, die het mogelijk maken gelijkspannings- en wisselspanningssystemen te koppelen.

Gelijkspanningskabels hebben enkele aantrekkelijke aspecten: er treedt geen skin-effect op, er zijn geen verliezen in de mantel t.g.v. geïnduceerde stromen; de isolatieverliezen zijn te verwaarlozen. De isolatie kan verhoudingsgewijs dun zijn; daardoor is de kabel hoog belastbaar.

Ook vanuit het oogpunt van transmissie-techniek heeft gelijkspanning zekere voordelen, die echter in dit bestek niet besproken kunnen worden. De voornaamste hinderpaal voor een meer algemene toepassing van gelijkspanningstransmissie is de hoge prijs van de convertorstations. Over de gehele wereld vindt men nauwelijks meer dan tien verbindingen van dit type; het merendeel hiervan betreft volledig bovengrondse lijnen van zeer grote lengte (een paar honderd km). Verder kent men enkele onderzee-verbindingen, waarbij gelijkspanning duidelijk voordelen heeft.

Toepassing van gelijkspanningstransmissie in ons land zal zich — indien het ooit zover komt — vermoedelijk beperken tot enkele projecten die zich in het bijzonder daartoe lenen.

## III. Kabels van de toekomst

De hier te bespreken kabeltypen verschillen zodanig van de conventionele kabels, dat zij typisch als inno-

vaties zijn te beschouwen; achtereenvolgens worden besproken:

- de *buis*kabel (*spacer-cable*);
- de *cryogene kabel*, en wel a. de *diepgekoelde weerstandskabel*; en b. de *suprageleidende kabel*.

Deze kabels verkeren allen nog in het stadium van ontwikkeling; men mag met vrij grote zekerheid verwachten dat zij in de transmissiesystemen van de toekomst ook werkelijk zullen worden toegepast. Daarnaast stuit men in de literatuur regelmatig op artikelen over mogelijke toepassing van de *microgolfpip* voor transmissie van grote vermogens; dit onderwerp zal hier zeer beknopt besproken worden. Men kan nl. vrij eenvoudig aantonen dat deze transmissiemethode vrijwel met zekerheid niet voor praktische toepassing in aanmerking komt. Andere veel besproken ontwikkelingen, zoals de natrium-kabel, zijn uitsluitend bestemd voor een laag vermogen; zij blijven hier volledig buiten beschouwing.

### A. Buis

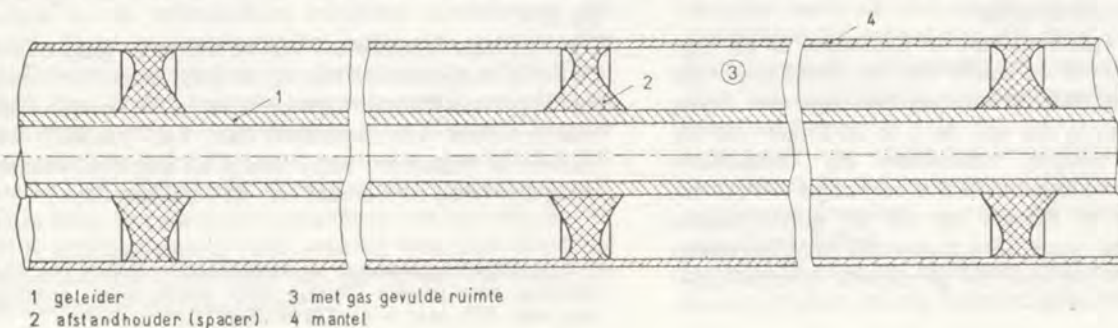
*Opbouw.* De buiskabel bestaat uit een met samengeperst gas<sup>1)</sup> gevulde metalen buis, in het hart waarvan zich de geleider bevindt; deze wordt door schijfvormige afstandhouders (*spacers*), die op onderlinge afstand van enkele m om de geleider worden gebracht, op zijn plaats gehouden (zie afb. 4 en 5). Het belangrijkste verschil met de conventionele kabel bestaat hierin, dat de isolatie bij de buiskabel praktisch volledig gasvormig is; dit gas kan eenvoudig uit lucht bestaan, hoewel men wegens de grotere doorslagvastheid de voorkeur geeft aan zwavelhexafluoride ( $\text{SF}_6$ ) of mengsels van dit gas met lucht.



afb. 5 - Een experimenteel model van een spacer zoals die in een buiskabel gebruikt kan worden; er zijn nog tal van andere vormen denkbaar. Een belangrijk deel van de ontwikkeling van de buiskabel beoogt het bepalen van de optimale vorm van de spacers. (Foto N.K.F.).

<sup>1)</sup> De doorslagspanning van een gas stijgt wanneer de druk van het gas toeneemt.

afb. 4 - Schematische weergave van een buiskabel in langsdoorsnede. Spacers (zie ook afb. 5) houden de geleider op zijn plaats. De ruimte tussen de geleider en de mantel is gevuld met samengeperst gas, bijv.  $\text{SF}_6$ . Samengeperst gas is het enige medium dat een goede elektrische isolatie combineert met een goede geleiding van warmte; daardoor kan een hoge bedrijfsspanning worden bereikt, terwijl de goede afvoer van warmte een hoge bedrijfsstroom mogelijk maakt.





Het is nog niet bekend op welke afmetingen men bij optimale vormgeving zal uitkomen; wel kan worden gezegd dat de diameter enige malen groter is dan die van de oliedrukkabel. De afmetingen zijn te vergelijken met die van gasbuizen in hoofdverbindingen van het Nederlandse aardgasnet; men denkt aan een starre constructie, opgebouwd uit 20 m lange segmenten. Deze worden in de fabriek vervaardigd en beproefd en op de plaats van bestemming aan elkaar gelast.

*Essentiële problemen.* Er moet voor gezorgd worden dat geen spanningsoverslag langs de oppervlakken van de spacers optreedt. Dit vraagt een bijzondere vormgeving van de spacers, die er bovendien op berekend moeten zijn, de grote krachten op te vangen die in het bijzonder bij kortsluitingen optreden.

Het is van zeer groot belang stofdeeltjes, die de doorslagspanning verlagen, buiten de kabel te houden; dit vraagt vooral bij het assembleren in het veld speciale voorzieningen. Met een speciale beproevingsmethode zal moeten worden aangetoond dat de gelegde kabel inderdaad aan de gestelde eisen voldoet; daarnaast vragen nog vele andere problemen om oplossing, zoals corrosiebescherming, uitzetting bij verwarming en lassen.

In Amerika is reeds een korte lengte in gebruik; de genoemde problemen zijn dus in principe alle oplosbaar. Het gaat er nu om, deze oplossingen zodanig te kiezen dat de buiskabel ook bij lage vermogens nog met andere kabeltypen kan concurreren; men mag verwachten dat deze kabel in ieder geval binnen de eerstkomende tien jaar ook in Europa zijn intrede zal doen.

*Te verwachten transportcapaciteit.* Zolang de afmetingen van de kabel niet vast liggen is het niet mogelijk, de transportcapaciteit van een buiskabelverbinding te berekenen. Voorlopige berekeningen tonen echter aan dat de buiskabel zeer hoog belastbaar is. De grote buisdiameter geeft een groot koelend oppervlak; het gas kan door convectie (d.w.z. warmtegeleiding door stroming van het gas) de geleider-warmte zonder veel weerstand naar de omgeving afvoeren. Door de geringe verliesfactor zijn de isolatieverliezen klein; ook bij 1000 kV zijn deze nog volkomen aanvaardbaar.

Bij 380 kV kan per 3-fasen circuit een transportcapaciteit van 2500 à 3000 MW worden bereikt (ruim tweemaal zo hoog als bij oliedrukkabel). Bij 1000 kV rekent men op een vermogen van ca. 7000 MW; bij toepassing van koeling liggen deze bedragen nog een factor 1,5 à 2 hoger.

Het is moeilijk, bij een nog te ontwikkelen kabel aan te geven bij welk vermogen zo'n kabel goedkoper is dan de bestaande kabeltypen. Voorlopige berekeningen wijzen uit dat een buiskabel van 380 kV vanaf ca. 4000 MW (per verbinding van twee circuits) met oliedrukkabel kan concurreren.

Een belangrijk voordeel van de buiskabel is de lage capaciteit; zo wordt verwacht dat een buiskabel voor 380 kV een capaciteit zal hebben die ongeveer zeven maal zo klein is als die van de  $1 \times 2000 \text{ mm}^2$  380 kV oliedrukkabel, waarbij bovendien de toelaatbare stroomsterkte met een factor 2,5 verhoogd wordt. Het gevolg hiervan is dat de op blz 29 gedefinieerde 'bruikbare lengte' voor deze buiskabel ruim zeventien maal zo groot is als voor de genoemde oliedrukkabel (ca. 400 km).

De kosten van compensatie nemen tengevolge van de lagere capaciteit per meter af; zij zullen naar ruwe schatting ongeveer 1% van de investering bedragen. Bij 380 kV is de buiskabel vanaf 4000 MW een goede voortzetting voor de bovengrondse lijn, er zijn uitbreidingsmogelijkheden tot hogere spanningen, waarbij een transmissiecapaciteit van 7000 MW bereikt kan worden.

## B. Cryogene kabel

Bij cryogene kabels wordt de geleider zo sterk gekoeld, dat ook bij volledige belasting van de kabel de temperatuur extreem laag is: men denkt bijv. aan temperaturen waarbij helium, waterstof of stikstof vloeibaar zijn, dus in een gebied van 4 tot 7 K<sup>1)</sup>. Bij deze zeer lage temperaturen neemt de elektrische weerstand van zeer zuiver metaal af tot een fractie van de waarde bij kamertemperatuur. Daarnaast kent men metalen die bij een bepaalde (zeer lage) temperatuur hun weerstand volledig verliezen: zij worden *supra-geleidend*.

Bij cryogene kabels dient de koeling niet zo zeer om de warmteverliezen af te voeren, dan wel om deze verliezen drastisch te verkleinen. Behoudt de geleider hierbij nog een zekere weerstand, dan spreekt men van *diepgekoelde weerstandskabel*; is de geleiderweerstand nul t.g.v. suprageleiding, dan spreekt men van *suprageleidende kabel*.

## C. Diepgekoelde weerstandskabel

De elektrische weerstand van aluminium met een zuiverheid van 99,999% is bij 20 K ongeveer 500 maal zo klein als bij kamertemperatuur; bij gelijkstroom nemen de geleiderverliezen bij intensieve koeling tot 20 K dus af met een factor 500. Bij wisselspanning ligt dit iets ongunstiger wegens het optreden van het skin-effect; bovendien moet men daarbij nog op neven-effecten t.g.v. de geïnduceerde stromen bedacht zijn.

Men kan in ieder geval stellen dat de stroombelastbaarheid aanzienlijk toeneemt doordat de warmteverliezen bij lage temperatuur sterk afnemen, zij het dan bij wisselspanning in mindere mate dan bij gelijkspanning. Daar staat echter tegenover dat het koelrendement bij lage temperatuur zeer ongunstig is: voor het afvoeren van 1 kW aan warmte heeft men bij 20 K ongeveer 40 kW aan energie nodig, bij 4 K zelfs 400 à 800 kW.

Bij hogere temperatuur liggen deze rendementen gunstiger, maar daar zijn de weerstandsverliezen weer hoger. Voor ieder metaal bestaat er een optimale temperatuur waarbij de energie voor het afvoeren van de geleiderverliezen minimaal is; voor aluminium ligt deze bij 20 K.

Door de lage temperatuur zijn de verliezen laag en kan de kabel hoog worden belast; dit gaat echter ten koste van hoge investeringen (telkens na ca. 10 km een koelstation, dure vacuümisolatie om het inleken van warmte te beperken, enz.) terwijl de exploitatiekosten hoog zijn (laag rendement van de koelinstallatie).

<sup>1)</sup> Zeer lage temperaturen drukt men uit in Kelvin (K). Omrekening naar graden Celsius vindt plaats door vermindering met 273. ( $4 \text{ K} = 4 - 273 = -269 \text{ }^\circ\text{C}$ ).



#### Transportcapaciteit

Evenals bij de buiskabel kan ook hier moeilijk worden aangegeven bij welk vermogen de diepgekoelde weerstandskabel goedkoper wordt dan de conventionele kabel. Men geeft hiervoor waarden op tussen 6000 en 8000 MW per verbinding van twee circuits; voor de buiskabel bedroeg dit 4000 MW. Voorzover nu kan worden overzien zou de toepassing van de diepgekoelde kabel dus door ontwikkeling van de buiskabel kunnen worden vertraagd.

In verschillende landen wordt aan de ontwikkeling van deze kabel druk gewerkt; zij is bijzonder kostbaar en in vele gevallen alleen mogelijk wanneer verschillende industrieën samenwerken. De diepgekoelde weerstandskabel wordt wel gezien als een eerste stap tot een suprageleidende kabel.

#### D. Suprageleidende kabels

Hierbij bestaat de geleider uit materiaal dat beneden een zekere overgangstemperatuur zijn weerstand volledig verliest; dit lijkt op het eerste gezicht bijzonder aantrekkelijk: men is in één keer alle geleiderverliezen kwijt. Suprageleiding heeft bovendien het voordeel dat men hiermee de mogelijkheid heeft het magneetveld, dat om iedere stroomvoerende geleider wordt opgebouwd, volledig af te schermen; met een suprageleidend scherm kan men dus alle inductiestromen volledig vermijden. De mantelverliezen, die bij alle tot dusver besproken wisselspanningskabels (ook bij de diepgekoelde weerstandskabel) de belastbaarheid beperken, worden bij suprageleiding volledig onderdrukt; bovendien kan men op deze manier voorkomen dat de fasen elkaars belastbaarheid beïnvloeden: men kan de drie fasen zonder bezwaar in één kabel onderbrengen. Het blijkt echter niet mogelijk al deze voordelen in de praktijk volledig te realiseren. Een suprageleider kan niet tot een willekeurig hoge stroomsterkte belast worden; bij verhoging van de stroomsterkte boven een zekere waarde gaat de suprageleiding verloren.

Bij de oudst bekende suprageleidende materialen (zgn. *zachte suprageleiders of type-I-geleiders*) verloopt deze overgang van suprageleiding naar normale geleiding bijzonder scherp en wel bij vrij lage stroomsterkte. Dit betekent vooral daarom een beperking van de toepasbaarheid omdat men altijd bedacht moet zijn op grote kortsluitstromen: men moet voorkomen dat de kabel daarbij plotseling normaal geleidend — en onherstelbaar beschadigd — wordt. Men kent echter sedert enige jaren ook de *type-II-geleiders* (zgn. *harde suprageleiders*) waarbij de bovengenoemde overgang via een zgn. *intermediaire toestand* verloopt. In deze toestand komen in de geleider normaal geleidende gebieden voor die echter in zekere zin door suprageleidend materiaal worden kortgesloten, zodat de weerstand in de intermediaire toestand voortdurend nul blijft. Deze suprageleidende materialen kunnen dan ook tot aanzienlijk hogere stroomsterkte worden belast. Een ander hiermee samenhangend voordeel is dat deze harde suprageleiders tot aanzienlijk hogere temperatuur gebruikt kunnen worden, waarbij dus gewerkt kan worden met een gunstiger koelrendement. Er is zelfs een materiaal ontwikkeld dat tot even boven 21 K suprageleidend blijft, waarbij men dus vloeibaar waterstof als koelmiddel kan gebruiken; dit materiaal is overigens nog zeer duur.

Voor gelijkspanningskabel biedt suprageleiding vrij gunstige perspectieven; voor wisselspanningskabel blijven er echter nog grote moeilijkheden bestaan. Bij gebruik van type-II-geleiders in een wisselspanningskabel wordt de intermediaire toestand, die reeds bij vrij lage stroomsterkten ontstaat, bij iedere spanningswisseling afgebroken en weer opgebouwd; dit kost energie, die als warmte verloren gaat. Gezien het lage koelrendement worden deze verliezen reeds spoedig prohibitief. Het bovenstaande wordt gecompliceerd door het feit dat de vorm en afmetingen van de geleider en de mechanische bewerking die het materiaal heeft ondergaan, van grote invloed zijn.

Bij suprageleiding blijft de stroom beperkt tot een zeer dunne laag aan de buitenzijde van de geleider. Dit lijkt op het skin-effect, maar is in dit geval typerend voor suprageleiding; het treedt ook bij gelijkstroom op. Men kan het dure suprageleidende materiaal als een dunne laag op een normaal geleidende kern aanbrengen.

Men tracht de bovengenoemde moeilijkheden op te lossen door de geleider uit verschillende delen op te bouwen, waarbij de stroomvoerende elementen van de verschillende fasen elkaars veld zoveel mogelijk zwakken. Anderen passen weer geleiders toe waarbij verschillende suprageleidende materialen in verschillende lagen worden aangebracht (sandwich-constructie). De buitenste laag voert hierbij de stroom; wordt deze stroom te sterk, dan neemt de volgende laag de stroom in de intermediaire toestand over.

De belangrijkste vraag bij suprageleidende kabel is: wat gebeurt er bij *kortsluiting*?

Meestal brengt men in de geleider een voldoende hoeveelheid normaal geleidend materiaal aan, dat bij overbelasting tijdens kortsluiting de stroom overneemt. Dit buffermateriaal kan normaal koper zijn; dit heeft bij lage temperatuur een zeer lage weerstand. Bovendien kan het koper bij lage temperatuur vrij grote hoeveelheden warmte opnemen zonder daarbij sterk in temperatuur te stijgen; voorts vraagt het verdampen van het vloeibare gas ook vrij veel warmte. Op die manier kan men voorkomen dat een kortsluiting reeds meteen tot grote schade leidt; men krijgt daardoor enige tijd beschikbaar om de kabel af te schakelen.

Met het bovenstaande zijn slechts enkele problemen aangestipt die bij het ontwikkelen van de suprageleidende kabel moeten worden opgelost. Men is er vrij sterk van overtuigd dat het mogelijk is, binnen de eerstkomende tien jaar een eerste prototype suprageleidende kabel te realiseren. Dit zal vermoedelijk een gelijkspanningskabel zijn; het zal echter nog vrij lang duren voordat hieruit een betrouwbaar transmissiesysteem zal zijn ontstaan.

#### Transportcapaciteit en toekomstverwachtingen

Voorzover nu kan worden voorzien zal suprageleidende kabel eerst worden toegepast bij verbindingen van 10.000 MW (in dubbel-circuit); deze grens kan echter door komende ontwikkelingen worden verlaagd, bijv. door het ontwikkelen van suprageleiders van hogere temperatuur.

Men heeft nog enige tijd voor deze ontwikkelingen: men verwacht dat er eerst na 1990 — en dan nog in incidentele gevallen — vraag zal ontstaan naar suprageleidende kabel.

De ontwikkeling zal voor een deel betrekking hebben op constructie van de kabel en als zodanig typisch op



het terrein van de kabelfabrikant liggen; daarnaast zal men zoeken naar nieuwe materialen, die bij zo hoog mogelijke temperatuur met aanvaardbare verliezen een hoge stroombelastbaarheid mogelijk maken. Dit is een fysisch-technologisch probleem!

Tenslotte zal men de typisch cryogene technieken moeten uitwerken: verbetering van koelrendement, eigenschappen van vloeibare gassen, warmteisolatie, enz. Dit is het gebied van de koude-specialist!

Deze ontwikkeling is niet alleen zeer kostbaar, maar vereist ook een zeer nauwe samenwerking tussen de in bovengenoemde onderwerpen gespecialiseerde bedrijven.

Men mag niet verwachten dat de hier aangeduide problemen in korte tijd zodanig zullen worden opgelost dat men de kabel tot nagenoeg onbegrensde stroomsterkten zal kunnen belasten. Het is onwaarschijnlijk dat men op deze manier grote vermogens bij zeer lage spanningen zal kunnen transporteren. De spanning zal vermoedelijk vrij hoog moeten blijven, bijv. minstens 150 of zelfs 300 kV; men behoudt dus het probleem van de isolatie en de daarin optredende verliezen.

#### E. Microgolfpijp

Bij energietransmissie m.b.v. wisselspanning bedraagt de frequentie als regel 50 Hz, d.w.z. de spanning wisselt met 50 perioden per seconde. Men kan deze frequentie opvoeren tot bijv. 5.000.000.000 Hz (= 5000 MHz); dan komt men in het gebied van de *zeer korte radiogolven* of *microgolven*, zoals ook bij radar worden gebruikt. Men kan deze golven m.b.v. een antenne in de ruimte uitstralen; doch men kan hen ook door een metalen buis geleiden: deze is dan een microgolfpijp. De elektrische energie, aan de ene kant ingestraald, kan aan de andere kant weer worden opgevangen; men kan de microgolfpijp dus voor energietransmissie gebruiken.

Men kan aantonen dat de verliezen bij deze energietransmissie (hier meestal aangeduid als *damping*) zeer laag kunnen worden gehouden wanneer men de ener-

gie op een zeer bepaalde wijze instraalt en wanneer de afmetingen der buis aan zekere voorwaarden voldoen.

Werkt men dit uit voor een vermogen van 1000 MW, dan blijkt dat de buis met praktisch onbereikbaar grote nauwkeurigheid moet worden geconstrueerd. De grootste problemen schuilen echter nog aan het begin en het eind van de lijn. Het rendement van de omzetting van lage naar hoge frequenties is laag: 10 à 20 % is al mooi; dit betekent dat bij 1000 MW in de zender reeds 800 MW verloren gaat. Dit is ongeveer 1/10 van het momenteel in ons land opgestelde vermogen!

In verband met het probleem van het afvoeren van de bij deze grote vermogens optredende verliezen zou dit rendement minstens 99,9 % moeten bedragen; het moet daarom uitgesloten worden geacht dat energietransmissie d.m.v. microgolfpijp voor grote vermogens ook maar enige reële kans van slagen heeft.

#### Literatuurverwijzing

- [1] Underground Power Transmission. A report to the Federal Power Commission by the commission's advisory committee on underground transmission. (April 1966)
- [2] Kreuger, F. H., Hoefnagel, L., Lelie, M. C.: 150 kV kabelverbindingen voor groot vermogen. *Elektrotechniek* 47 (1969) (20) p. 459 e.v.
- [3] Vermeer, J., Boone, W., Bussink, J., and Brakel, W.: TENAX, a new low-loss and high-temperature resistant synthetic paper for E.H.V. cables and other electrical equipment. Conference on El. Insulation and Dielectric Phenomena, Pocono Manor, 1970.
- [4] Fishlock, David: A Guide to Superconductivity. 1969. MacDonal, London and Am. Elsevier, New York.



## Hoofdstuk 5. Planologische aspecten

door prof. ir. H. Wiggerts

### Summary

*In a densely populated country, like the Netherlands, claims on the use of the land are cumulating and do often conflict. In physical planning these claims are confronted and weighed one against another. In the case of power transmission this applies particularly to the tracks and how they conflict with nature and agriculture. Furthermore attention is paid to the crossings with other lines of infrastructure and the danger of spoiling the landscape visually. Special attention is paid to the crossings with bird migration zones.*

*Most design principles which go for the tracking of roads, railways, etc. apply also for power circuits. Among them to combine the tracks with other infrastructure and to make square crossings, so as to avoid cutting up the land. If necessary, changes in level or a different transport medium should be considered (in this case underground cables).*

*Meanwhile physical planning grows from land use into dynamic control of social processes that express themselves geographically. This means that attention is not only paid to the power circuit tracks, but to the network as a whole. This will be confronted with the other infrastructure networks and models of population and industry. In this way parts of the networks or even systems as a whole may come under discussion, which eventually may lead to alternative solutions.*

*From the municipal plans, regional plans, and government policy, guidelines may be drawn for each sector-planning. Procedures which go with these plans assure coordination, integration and the weighing one against another of different interests.*

### I. Inleiding

In kringen van technici roept het woord planoloog een vaag beeld op van iemand die — pratend over mensen, vogeltjes en groen — lastig doet zodra de technische plannen op tafel liggen. In het kader van deze bundel over transmissiesystemen is het daarom wellicht nuttig allereerst in te gaan op de vraag wat het feitelijke doel en werkgebied van de planoloog is.

De planologie of ruimtelijke ordening is ontstaan in de alledaagse praktijk, vooral van het bouwen. De talloze individuele acties die beslag leggen op ruimten, zoals het bouwen van woningen en het aanleggen van wegen, vragen van oudsher reeds om een zekere ordening. Heel oud zijn reeds de rooilijnverordeningen; naderhand werden, ten behoeve van uitbreiding van steden en dorpen, tenminste de stratenplannen te voren vastgelegd opdat men wist waar bouwblokken zouden kunnen komen.

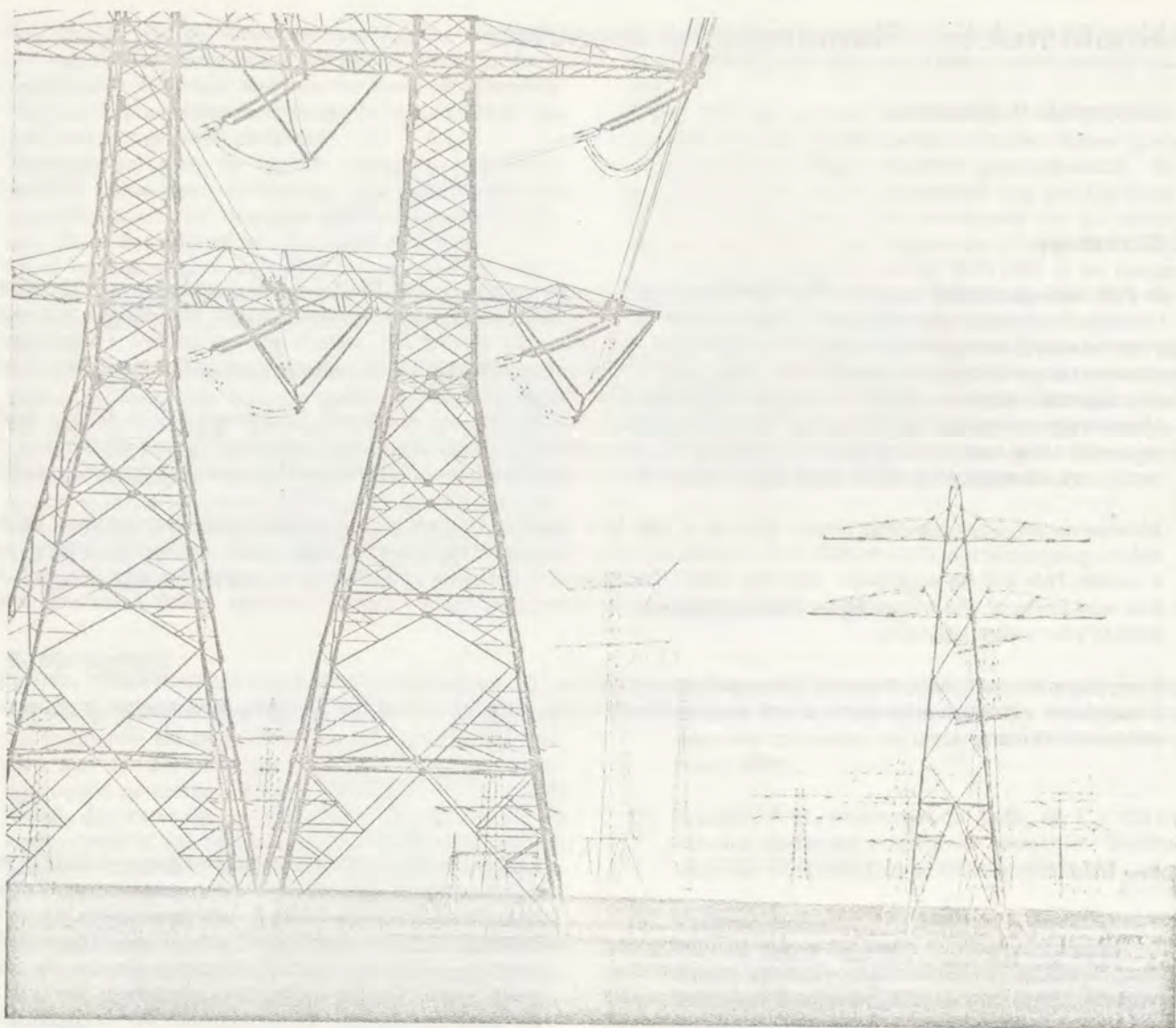
Ruimtelijke ordening, planologie of stedenbouw is daarom van oudsher een overheidstaak en een primaire overheidsverantwoordelijkheid. Het directe raakvlak tussen burger en overheid bij deze ordening ligt op het gemeentelijke vlak. Daar vindt de coördinatie van alle bouwactiviteiten plaats. In deze zin is planologie alles wat te maken heeft met de regeling van het grondgebruik. Het maken van grondgebruiksplannen, meest klein van schaal en betrekkelijk statisch van karakter, staat daarbij op de voorgrond. Men spreekt hier wel van microplanologie. Geleidelijk is echter de noodzaak gebleken om de ordening van het bouwproces en alles wat daarmee samenhangt, in steeds grotere verbanden aan te vatten. Langzamerhand leidt dit er toe dat planologie wordt de geleiding van sociaal-ruimtelijke pro-

cessen. In deze visie heeft de planologie een actief en dynamisch karakter en vormt een ruim en moeilijk te begrenzen vakgebied. Deze procesgerichte planning beweegt zich niet meer op de schaal van het gedetailleerde grondgebruik (micro), maar op die van de stad en de streek (meso) en het land als geheel (macro). Bij deze geleidelijke verruiming van het vakgebied is ook in toenemende mate begrip ontstaan voor het feit dat de planning in diverse sectoren van het maatschappelijk leven niet onafhankelijk bedreven kan worden. Deze sectoren grijpen in elkaar. Het bouwen van woningen, fabrieken of kantoren kan niet los worden gezien van de ontwikkeling van bijv. het wegensysteem of het openbaar vervoer, of ook — om terzake te komen — van het systeem van energieproductie en -transmissie. Op eenzelfde manier zijn andere toelieferingen en voorzieningen in de maatschappij steeds weer onverbreekbaar verbonden aan vorengenoemde activiteiten.

Er ontstaat een geleidelijk inzicht in de noodzakelijke eenheid van planning. Die eenheid wordt nagestreefd door de planning in verschillende concrete werksectoren van het maatschappelijk leven (bijv. verkeersvoorzieningen, woningbouw, elektriciteitsvoorziening) vanuit verschillende meer algemene gezichtspunten met elkaar in verband te zien en te integreren. De planologie doet dat vanuit het ruimtelijke gezichtspunt. Andere vormen van facetplanning vindt men in de economie en de sociaal-culturele planning.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Zie voor een nadere uitwerking van de begrippen facet- en sectorplanning het rapport van de Commissie Voorbereiding Onderzoek Toekomstige Maatschappijstructuur, de z.g. commissie de Wolff; een samenvatting hiervan is gepubliceerd in "De Ingenieur" van 30 oktober 1970.





Bovengrondse hoogspanningslijnen zijn visueel dominant: kruispunt van 380 kV- en 150 kV-lijnen bij Geertruidenberg. (Foto N.K.F.).

De gelijkgerichtheid van de ontwikkelingen in verschillende sectoren wordt bevorderd door een aantal planologische procedures, maar vooral doordat in de planologie aan een — steeds herzien — samenhangend toekomstbeeld wordt gewerkt. In feite wordt dit geboden in het overlappende geheel van gemeentelijke bestemmings- en structuurplannen, provinciale streekplannen en nationaal ruimtelijk beleid. Het laatste vindt — op dit moment nog — zijn meest volledige samenvatting in de Tweede Nota over de Ruimtelijke Ordening en vooral de daarbij gevoegde ruimtelijke structuurschets voor 2000. Enkele sleutelbegrippen — het bestek van dit artikel laat niet meer toe dan ze te signaleren — zijn: stadsgewesten, stedelijke gebieden, centrale open ruimte, milieudifferentiatie en gebundelde deconcentratie.<sup>1)</sup>

In het navolgende zal allereerst op het klassieke micro-aspect van de planologie worden ingegaan; de pro-

blemen die in een directe confrontatie van de bovengenoemde transmissielijnen met de omgeving ontstaan. Daarna zal in de lijn van het voorgaande ook bezien worden hoe bij beschouwing op grotere schaal een ander soort aanpak naar voren komt.

## II. Micro-planologische aspecten van bovengrondse transmissiesystemen

Bovengrondse hoogspanningslijnen zijn visueel meer dominant dan andere infrastructuren en ze kunnen aanleiding geven tot storing van radio-ontvangst. Daar staat echter tegenover dat — in tegenstelling tot bijv. het verkeer — geen geluidshinder en luchtverontreiniging optreden.

Ook kan worden vastgesteld, dat de aanslag op het landschap tot op heden betrekkelijk gering is, indien men de totale lengte van de bestaande landelijke transmissienetten (in 1970 iets minder dan 2000 km) vergelijkt met bijv. de totale lengte van ons interlokale

<sup>1)</sup> Zie Tweede Nota over de Ruimtelijke Ordening (regeringsnota 1966); voor enkele grondgedachten van deze nota zie men evt. mijn artikel in "De Ingenieur" van 6 oktober 1967, waar ook een verkleinde weergave van de ruimtelijke structuurschets 2000 in is opgenomen.





Het doorsnijden van landschappen: 380 kV-lijnen en masten bij Doodewaard. (Foto W. van Heusden).

wegennet (in 1970 ongeveer 9000 km planwegen en circa 38000 km niet-planwegen).

De problemen zijn overigens in essentie niet zo verschillend van die bij andere lineaire technische infrastructuren zoals wegen, spoorlijnen, kanalen e.d. Ook hierbij bestaat de kans dat stadsmilieus of landschappen doorsneden worden en dat er een visueel schaalbederf optreedt; voorts dreigt aantasting van de huidige functies van gebieden zoals de agrarische bedrijfsvoering of de ontwikkeling van de levende natuur (de biotoop).

De planologische bemoeienis bij de tracering van hoogspanningslijnen bestaat in wezen uit het signaleren van dergelijke conflicten en de afweging van de verschillende daarbij naar voren komende belangen. Dat er een hoogspanningslijn moet komen wordt daarbij als gegeven aanvaard en er wordt alleen nog ge-

zocht naar een zo goed mogelijke doorvoering van de betreffende lijn: men kan er enigszins mee schuiven maar de speelruimte is beperkt. In de praktijk betekent dit dat vooral aandacht wordt besteed aan de kruisingen met andere infrastructuren en de visuele aantasting van het landschap. Bijzondere aandacht wordt besteed aan de kruising van vogeltrekroutes.

Als vormgevende principes bij dergelijke tracering gelden dezelfde soort overwegingen als bij de tracering van andere lijntracé's, zoals t.b.v. wegen, spoorwegen e.d. De belangrijkste daarvan zijn dat er zoveel mogelijk gestreefd wordt naar haakse kruisingen en naar het bundelen van lijnen en voorzieningen. Hiermede wordt versnijding van de ruimte zoveel mogelijk voorkomen.

Een ander vormgevend principe bij dergelijke infrastructuur in benepen situaties is het gebruik van de



derde dimensie. In het wegennet zal men steeds meer overgaan op ongelijkvloerse kruisingen en — bij de invoer in stedelijke gebieden — op wegen die over grote lengten op viaducten of in tunnels worden gelegd. Voorts wordt bezien in hoeverre een andere vervoerstechniek gebruikt kan worden. Bij het verkeer en vervoer bijvoorbeeld in hoeverre, daar waar het wegennet te dicht zou worden, het openbaar vervoer met z'n hoge ruimterendement de transportfunctie over kan nemen.

De parallel met elektriciteitstransmissie ligt voor de hand. Juist in dicht geoccupeerd gebied, zoals bij de invoer in stedelijke gebieden of de doorvoer door stedelijke zones, zal men vanuit de planologie een grote aandring uitoefenen op het gebruik van ondergrondse kabels i.p.v. bovengrondse lijnen (bijv. voor steeklijnen naar de steden).

Op deze micro-schaal van planologie is het vooral van belang om ook op de meer formele aspecten van de ruimtelijke ordening te wijzen. Met name bieden de bestemmings- en structuurplannen van de gemeenten het meest geëigende en ook wettelijk-gefundeerde integratiekader voor diverse ontwikkelingen en infrastructuur. Deze plannen komen tot stand via een uitvoerige procedure van ter visie legging, goedkeuringen op verschillende overheidsniveau's en inspraak van de bevolking. Daardoor bieden ze de mogelijkheid van integrale belangenafweging en een waarborg voor individuele rechtsbescherming.

Het is dan ook van groot belang dat men bij de ontwikkeling van het transmissienet voor elektrische energie zeer tijdig kennis neemt van de in voorbereiding zijnde ruimtelijke plannen en omgekeerd eigen gedachten voor de uitbouw van dat net in dat verband tijdig naar voren brengt, zodat een confrontatie met andere belangen plaats kan vinden.

In de voorbereiding en de procedure van de ruimtelijke plannen nemen de Provinciale Planologische Diensten een centrale plaats in. Geregeld overleg over plannen, liefst al in de eerste ideeënfase, kan veel frictie achteraf voorkomen. Op Rijksniveau is het planologisch overleg geformaliseerd in de Commissie Elektriciteitswerken, een adviescommissie van de Minister van Economische Zaken. Bij zeer controversiële zaken beslist de Ministerraad, doorgaans na advies van de Rijks Planologische Commissie.

### III. Planologische aspecten op het meso- en macroniveau

Zoals in het vorige gesteld, is op het micro-niveau in feite slechts de detaillering van de onderdelen van het transmissiesysteem in discussie. Men tracht deze zo goed mogelijk in te passen in de bestaande structuur en die van de bestaande plannen.

Op het meso- en macrosysteem wordt de structuur van het land in grotere verbanden gezien, die van hele landsdelen of zelfs het land als geheel. Het gaat daarbij niet meer om de inpassing van bepaalde elementen maar om de afstelling van het gehele systeem op andere systemen. Men ontkomt er op deze schaal niet meer aan om sprekend over de transmissie van elektrische energie, ook de plaats en omvang van de

productie-eenheden in de beschouwing te betrekken. In feite vormen elektrische energieproductie en -transmissie in het groter verband tesamen een subsysteem. Dit subsysteem komt vervolgens in discussie in de onderlinge aansluiting en aanpassing op het natuurlijk gegeven en de overige infrastructuur, zoals die daar zijn voor bijv. wegen en waterhuishouding.

In deze confrontatie van landelijke of regionale technische infrastructuur kan geen genoegen meer worden genomen met de interne optimalisatie van ieder van deze structuren of systemen. De interne optimalisatie geeft nl. geen waarborg voor het optimaal functioneren in groter verband. Zo is bij de planologische procedures voor de Bergumermeercentrale en de 380 kV lijn Diemen-Lelystad-IJsselmond de noodzaak zelf van vestiging, c.q. uitvoering, van deze elementen in discussie geweest. Er kwamen vragen in behandeling als: Zijn deze centrales c.q. hoogspanningslijnen wel nodig; zouden ze niet kunnen vervallen als het patroon van productie-eenheden en transmissie gewijzigd wordt; zou de, wellicht versnelde, uitvoering van andere productie-eenheden en transmissielijnen uitstel van het onderhavige onderdeel mogelijk maken? Met andere woorden het gehele netwerk van productie-eenheden en transmissie, zomede de fasering daarvan, kregen grotere aandacht.

In deze zin krijgt de planologische discussie en procedure meer en meer karakter van toetsing van de externe doelmatigheid van een bepaalde sectorplanning. In de planologische discussie en procedure komt de maatschappelijke verantwoording van de technische infrastructuur voorop te staan. I.p.v. lokale landschapsargumenten komen op dit niveau overwegingen in het geding als de structuurschema's en meerjarenprogramma's in andere infrastructuursectoren, stedelijke ontwikkelingsprioriteiten en het vestigingsklimaat voor de industrie.

Bij de ontwikkeling van de planologische bemoeienis in deze richting treden vaak spanningen op. De veelal sterke interne ratio van de planning in een bepaalde sector maakt, dat de vaak globale en minder scherp rationeel bepaalde bemoeienis vanuit een facet als de ruimtelijke ordening, aangevoeld wordt als hinderlijk en als een vorm van wantrouwen. Gelukkig blijkt echter in een aantal werkverbanden de bereidheid te groeien om de eigen ratio in iedere sector en ieder facet te erkennen. Het samenspel tussen sector- en facetplanners vraagt een wederzijdse openheid bij het opstellen en bezien van verschillende oplossingen en het bepalen van de hardheidsmarges van iedere variant. Over een panklare oplossing blijkt de discussie tussen deskundigen en niet-deskundigen op een bepaald technisch terrein vaak onvruchtbaar. Zinnig gesprek is echter wel mogelijk over de doelstellingen voor zo'n oplossing en dat niet alleen voor het gesprek tussen verschillende soorten vakmensen, maar ook voor de discussie met bestuurders en publiek (pers, actiegroepen). Op de weg naar een maatschappelijk verantwoord, geïntegreerde planning komen de doelstellingen dan ook steeds meer centraal te staan.

In de planologische methodiek<sup>1)</sup> treedt in dat verband voorts het opstellen van alternatieve modellen steeds meer op de voorgrond. Op de macroschaal zijn deze modellen doorgaans van een hoog abstractieniveau.

<sup>1)</sup> Zie ook Quené, Verstedelijking; de geleiding van een proces (De Ingenieur, 16 juli 1971.).





Het leggen van ondergrondse kabels. (Foto N.K.F.).

Een voorbeeld van een dergelijke modellenstudie op macroschaal is de integrale verkeers- en vervoersstudie van het Nederlands Economisch Instituut waarin een bevolkingsspreidingsmodel wordt bezien in verband met enkele alternatieven voor het landelijk wegennet en het spoorwegennet.

Wat betreft het elektriciteitsproductie- en transmissievraagstuk zijn soortgelijke modellenstudies gewenst. Daarbij zouden verschillende patronen van centrales en transmissielijnen (geconcentreerd, gedeconcentreerd, zwaartepunt aan de kust of elders etc.) geconfronteerd kunnen worden met modellen van bevolkingsspreiding, industrie, verstedelijking en waterhuishouding.

Door dergelijke studies kunnen bijv. de consequenties van het, voor de verstedelijking geldende, beleidsprincipe van de gebundelde deconcentratie voor het voorzieningspatroon voor elektrische energie duidelijk worden gemaakt. Omgekeerd kan een zekere toetsing, ook vanuit de energiesector, op de doelmatigheid van dat beleidsprincipe plaatsvinden.

Ten aanzien van de afstemming van de bedrijfsopzet van het elektrische voorzieningssysteem met het systeem van oppervlaktewateren is reeds een begin van dergelijke studies gemaakt.

#### IV. Enkele opmerkingen ter afsluiting

Allereerst een opmerking uit de praktijk van het planologisch overleg, met name ten aanzien van de kostenverschillen van alternatieve oplossingen. Een (door vakmensen) "uitgekiend" stukje infrastructuur is doorgaans in feite geoptimaliseerd op technische prestatie in verband met bouw- en exploitatiekosten. Treedt men vervolgens in overleg over inpassing in de omgeving dan komen er ineens een aantal moeilijk weegbare overwegingen in het geding, bijv. die van woonmilieu, natuurbehoud, e.d. Eventuele varianten die uit dit overleg voortkomen geven weliswaar een niet kwantificeerbare winst t.a.v. die aspecten, maar betekenen doorgaans ook een verhoging van kosten ten opzichte van de eerst voorgestelde oplossing. Er wordt dan wel gesteld — mijns inziens ten onrechte — dat "de gemeente" of "de natuurbescherming" de meerkosten maar moet betalen.

In de meso- en macrobenadering, waarbij gestreefd wordt naar onderlinge afstemming van de verschillende infrastructuurstelsels in hun geheel, komt men dergelijke argumenten niet of nauwelijks tegen.



De wederzijdse erkenning van de principiële volwaardigheid maar ook onvergelykbaarheid van beide stelsels sluit dat soort argumenten kennelijk uit.

Een tweede opmerking: De Wet op de Ruimtelijke Ordening legt de feitelijke integrale belangenafweging in de procedures van het gemeentelijk bestemmingsplan. Daarin vindt allereerst de bescherming van de rechten van individuele burger en grondeigenaar plaats. Daarin wordt ook het algemeen belang vastgesteld. Dit blijkt echter toenemende problemen te geven bij het tot stand brengen van voorzieningen van bovengemeentelijk belang waartoe doorgaans ook die voor de energievoorziening en -transmissie gerekend kunnen worden. De mogelijkheden voor wijziging van de procedures en regelingen, ten behoeve van afweging en vaststelling van plannen van bovengemeentelijk niveau, is thans in studie.

Een derde opmerking: Bij de steeds intensievere occupatie van de bodem neemt de aandrang, om zoveel mogelijk tot bundeling van voorzieningen te komen, toe. Bij dit streven tekent zich een tweetal ontwikkelingen af: enerzijds nieuwe beheersvormen voor intensief gebundelde voorzieningen nu, anderzijds het reserveren van corridors voor bepaalde voorzieningen in de toekomst.

Bij de pijpleidingen ziet men de vorming van centraal-

beheerde leidingstraten, voor bundels pijpleidingen, die zoveel mogelijk ook bij kruising van wateren en wegen in kunstwerken gebundeld worden doorgevoerd. Daarnaast kent men de leidingstroken, die van andere occupatie vrij worden gehouden om er — de een na de ander — een aantal individuele pijpleidingen doorheen te kunnen voeren. Het is niet ondenkbaar dat op den duur volledige transportstraten en -stroken nodig zullen zijn waarin ook wegen en hoogspanningslijnen een plaats zullen krijgen.

Tenslotte nog een opmerking met wat meer toekomst-fantasie — daar ziet men de planoloog immers ook vaak op aan — die de transmissie slechts zeer terzijde raakt.

Nu de landbouw met grote structurele moeilijkheden te kampen heeft komen in het planologisch werk steeds vaker gedachten naar voren om bestaand laaggelegen land om te zetten in water. Daarbij betrokken belangen zijn onder meer waterstaat, drinkwatervoorziening (spaarbekkens), recreatie en zandwinning.

Het zou nuttig kunnen zijn met deze gedachte rekening te houden bij de planning in de energiesector (met het oog op de koelwatervoorziening) en daar eventueel eigen wensen voor op tafel te brengen. Het patroon van energieproductiepunten en daarmee het transmissienetwerk zouden er echter ingrijpend door beïnvloed kunnen worden.



Overzicht van verschenen  
Stichtingspublicaties

- |  |   |  |
|--|---|--|
| 1. Toekomstbeeld der Techniek;<br>ir. J. Smit, 1968  | uitverkocht                               |  |
| 2. Techniek en Toekomstbeeld,<br>Telecommunicatie in telescopisch beeld;<br>prof. dr. ir. R.M.M. Oberman, 1968   | uitverkocht                               |  |
| 3. Verkeersmiddelen;<br>prof. ir. J.L.A. Cuperus en anderen, 1968  | f 10,—                                    |  |
| 4. Hoe komt een beleidsvisie tot stand?<br>ir. P.H. Bosboom, 1969  | f 4,—                                     |  |
| 5. De overgangprocedure in het verkeer;<br>diverse auteurs, 1969   | f 12,—                                    |  |
| 6. De invloed van goedkope elektrische<br>energie op de technische ontwikkeling in<br>Nederland;<br>dr. P.J. van Duin, 1971  | f 5,—                                     |  |
| 7. Electrical energy needs and environmental<br>problems, now and in the future;<br>diverse auteurs, 1971  | f 12,—                                    |  |
| 8. Mens en milieu: prioriteiten en keuze;<br>diverse auteurs, 1971   | f 17,—                                    |  |
| 9. Het voeden van Nederland;<br>diverse auteurs, 1971  | f 12,—                                    |  |
| 10. Barge Carriers: some technical, economic<br>and legal aspects;<br>drs. W. Cordia, mr. G.J.W. de Vries en ir.<br>N. Wijnolst, 1972  | f 20,—                                    |  |
| 11. Transmissiesystemen voor elektrische<br>energie in Nederland;<br>prof. dr. J.J. Went, ir. A. Govers, drs.<br>M.C. Lelie en prof. ir. H. Wiggerts, 1972   | f 12,—                                    |  |
| 12. Elektriciteit in onze toekomstige energie-<br>voorziening: mogelijkheden en conse-<br>quenties;<br>dr. ir. H. Hoog, ir. P.J. Wemelsfelder,<br>prof. ir. D.G.H. Latzko, dr. D.J. Kroon en<br>prof. ir. J.J. Broeze, 1972  | <del>f 15,—</del> <i>herdruk</i><br>19,50 |  |
| 13. Communicatiestad 1985: elektronische<br>communicatie met huis en bedrijf;<br>prof. dr. ir. J.L. Bordewijk e.a., ir. D. van<br>den Berg, dr. W. Horn, 1973  | f 16,—                                    |  |
| 14. Techniek en preventief gezondheidson-<br>derzoek; dr. M.J. Hartgerink, dr. H.H.W.<br>Hogerzeil, prof. dr. ir. P. Eykhoff, prof. dr.<br>J.C.M. Hattinga Verschure, prof. dr.<br>H.J.J. Leenen, dr. P. Gootjes, prof. dr.<br>A.H. Wiebenga, ir. D.H. Bekkering, 1973 | f 18,—                                    |  |
| 15. Technologisch verkennen: doelstellingen<br>en methoden;<br>ir. A. van der Lee, drs. Th.M.A.<br>Bemelmans en dr. ir. W.J. Beek, 1973  | f 24,—                                    |  |
| 16. Mens en milieu: beheerste groei;<br>diverse auteurs, 1973  | f 20,—                                    |  |
| 17. Mens en milieu: zorg voor zuivere lucht;<br>diverse auteurs, 1973  | f 20,—                                    |  |
| 18. Mens en milieu: kringloop van materie;<br>diverse auteurs, 1973  | f 20,—                                    |  |
| 19. Energy Conservation: Ways and Means;<br>edited by J.A. Over and A.C. Sjoerdsma,<br>1974  | f 34,—                                    |  |
| 20. Voedsel voor allen, plaats en rol van de<br>EEG;<br>prof. dr. J. Tinbergen, prof. dr. ir. J. de<br>Hoogh, dr. J.R. Jensma, prof. drs. J. de<br>Veer, ir. I.B. Warmenhoven, dr. ir. A.W.G.<br>Koppejan, ir. K.K. Vervelde, dr. ir. W.J.<br>Beek, 1976               | f 35,—                                    |  |
| 21. Stedelijk verkeer en vervoer langs nieuwe<br>banen?<br>Redactie: ir. J. Overeem, 1976  | f 48,—                                    |  |
| 22. Materialen voor onze Samenleving;<br>Redactie: ir. J.A. Over, 1976   | f 46,—                                    |  |

De publicaties kunnen worden besteld door overma-  
king van het aangegeven bedrag op postgironummer  
1609900 van de Stichting te 's-Gravenhage, onder  
vermelding van het nummer van de gewenste publika-  
tie. Publicaties kunnen ook tegen contante betaling  
worden afgehaald van het kantoor van de Stichting,  
Prinsessegracht 23, 's-Gravenhage. In dat geval wordt  
een korting van f 3,— per publicatie verleend.

Gedrukt door Mouton & Co B.V., Den Haag



TT