

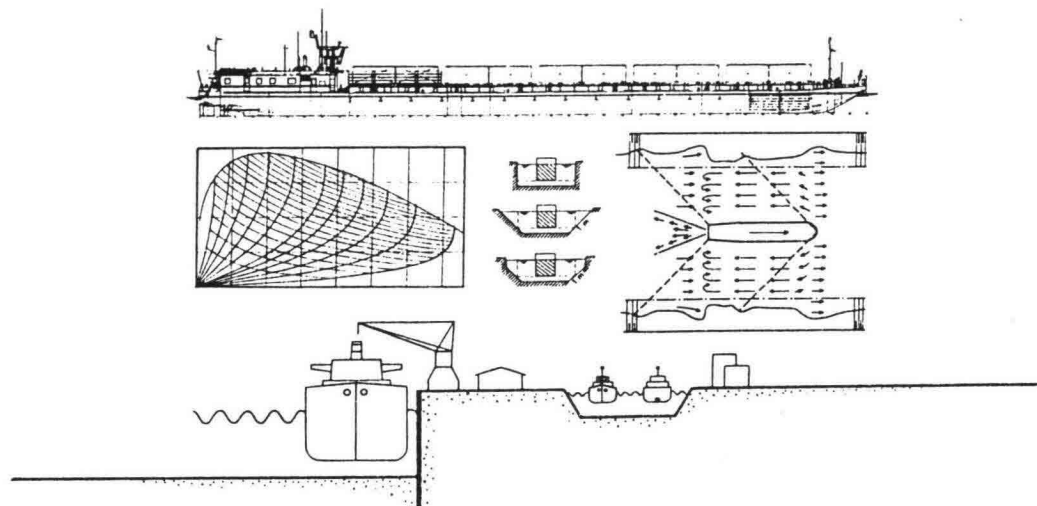
f12N

Binnenscheepvaart en scheepvaartwegen

Havens en scheepvaartwegen I

Januari 1987

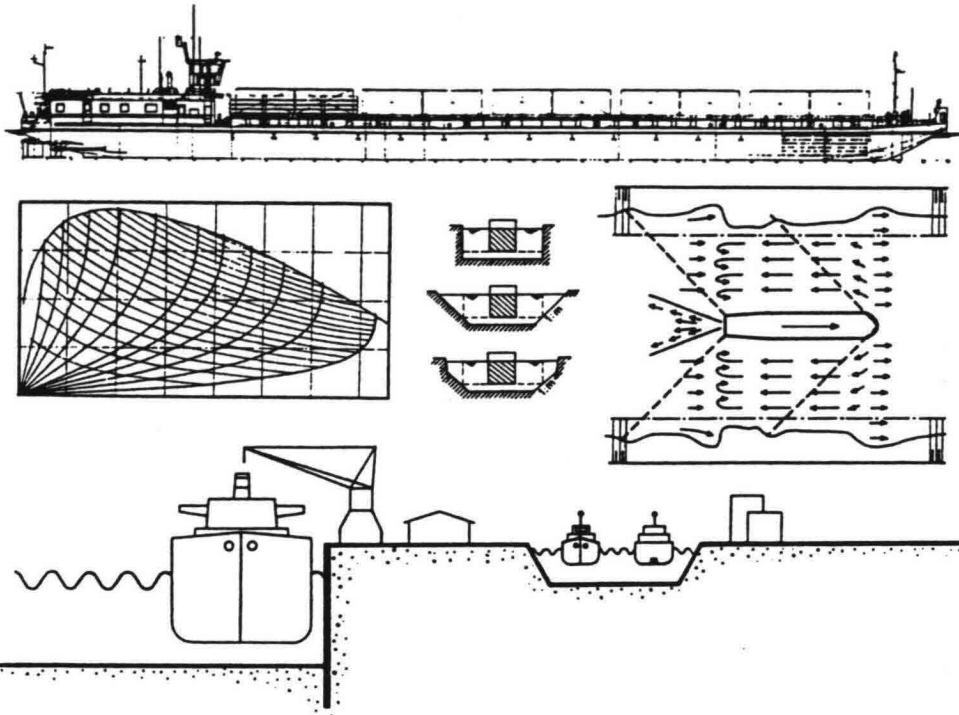
Ir. J. Bouwmeester



BINNENSCHIEPVAART EN SCHEEPVAARTWEGEN

f12N - Havens en scheepvaartwegen

ir. J. Bouwmeester



Technische Universiteit Delft
 Faculteit der Civiele Techniek
 Vakgroep Waterbouwkunde

uitgave mei 1985	1e gew. druk januari 1987
---------------------	------------------------------

f12N

653080

f 10,-

Voorwoord

Deze geheel herziene handleiding vormt een onderdeel van het 3e-jaars kollege 'Havens en scheepvaartwegen' (f12N). Behandeld wordt de binnenscheepvaart in samenhang met de natuurlijke en kunstmatige vaarwegen. Voor wat betreft de natuurlijke scheepvaartwegen wordt, voor de morfologische processen en de ingrepen in een rivier die nodig zijn voor de scheepvaart, verwezen naar het 3e-jaars kollege 'Rivieren' (f8N).

Gezien de voortgaande ontwikkeling onder andere ten aanzien van de schaalvergroting in de binnenvaart - waaronder de invoering van de zesbaks duwvaart - wordt er nog regelmatig onderzoek verricht, speciaal voor wat betreft de hydraulische belasting op oevers bij toenemende motorvermogens. De hiermee samenhangende eisen ten aanzien van economisch verantwoorde dimensionering van dwarsprofielen met een toenemende vraag naar milieuvriendelijke oeververdedigingen maken dat deze handleiding regelmatig bijstelling behoeft. Op de hoorkolleges zullen de laatste ontwikkelingen worden meegenomen.

Ter completering en voor een beter begrip is in dit diktaat veel achtergrondinformatie opgenomen. Hierbij wordt o.a. bedoeld op de hoofdstukken 2 en 3, en op de bijlagen. De hierin behandelde stof hoeft niet tot in detail te worden beheerst; wel wordt naast inzicht verwacht dat de hoofdlijnen op het tentamen bekend zijn.

Bij de herziening van deze handleiding gaat mijn dank uit naar de 'Werkgroep Binnenscheepvaart' voor wat betreft relevante praktijkinformatie, aanvullingen en korrekties. In het bijzonder geldt dit voor ing. M.T. van der Meer, medewerker bij de vakgroep Waterbouwkunde.

Indien U bij de bestudering van dit diktaat onvolkomenheden ontdekt of op onduidelijkheden stuit, wordt melding daarvan uiteraard zeer op prijs gesteld.

ir. J. Bouwmeester
januari 1987

INHOUD

	blz.
Voorwoord	
1. Inleiding	1
2. Schepen voor de binnenvaart	5
2.1. Indeling van de binnenvaart	5
2.2. Schepen zonder eigen voortstuwing	11
2.2.1. Sleepschepen	11
2.2.2. Duwbakken	12
2.3. Sleepboten	14
2.3.1. Binnensleepboten	14
2.3.2. Havensleepboten	16
2.4. Motorvrachtschepen	17
2.4.1. Motorvrachtschepen voor droge lading	17
2.4.2. Motortankschepen	18
2.4.3. Containerschepen	20
2.4.4. RoRo-schepen	22
2.4.5. Zeegaande binnenschepen	23
2.5. Duwvaart	24
2.5.1. Duwvaart in Amerika	24
2.5.2. Duwvaart in Europa	26
2.6. Ontwikkelingen	32
2.7. Scheepskarakteristieken	35
2.7.1. Enige begrippen	35
2.7.2. Vormgeving	36
2.7.3. Voortstuwingssysteem	37
2.7.4. Roersysteem	38
2.7.5. Kopbesturing	40
2.7.6. Vaarsnelheid	43
2.7.7. Stopweglengte	44
3. Wisselwerking tussen schip en vaarweg	47
3.1. Inleiding	47
3.2. Primaire waterbeweging	49
3.2.1. Methode met behoud van energie	52
3.2.2. Methode met behoud van impuls	62
3.2.3. Scheepsweerstand en stuwdruk	66
3.2.4. Vaarsnelheid in relatie tot het motorvermogen	69
3.2.5. Toetsing ééndimensionale waterbewegingsmodellen	71
3.2.6. Numerieke uitwerking van een voorbeeld	72
3.2.7. Hydraulische verschijnselen bij een inhaalmanoeuvre	76
3.3. Secundaire waterbeweging	79
3.3.1. Golfhoogte van de interferentiepieken	83
3.3.2. Golfhoogte van de transversale golven	85
3.4. Overige hydraulische verschijnselen	86

	blz.
4. Kunstmatige scheepvaartwegen	95
4.1. Inleiding	95
4.2. Dimensionering van het dwarsprofiel	100
4.2.1. Klasse-indeling en afmetingen maatgevende schepen	100
4.2.2. Vorm en parameters van het dwarsprofiel	103
4.2.3. Normen voor de vaarwegdiepte	104
4.2.4. Normen voor de vaarwegbreedte	108
4.2.5. Normen voor het vaarwegdwarsprofiel	120
4.2.6. Diskontinuiteiten en andere nevenaspecten	125
4.3. Dwarsprofiel in bochten	129
4.4. Lengteprofiel en tracé	138
4.4.1. Het tracé	139
4.4.2. Het lengteprofiel	140
5. Natuurlijke scheepvaartwegen	147
5.1. Inleiding	147
5.2. Klassificatie van rivieren	150
5.3. Afmetingen van de schepen	153
5.4. De rivier als scheepvaartweg	154
5.5. Rivierhavens en aanlegplaatsen	162
Literatuur	165
Voornaamste symbolen	179
Bijlage 1. Marktstructuur en regelingen in de binnenvaart	179
B1.1. Marktstructuur	179
B1.2. Toerbeurtsystemen	181
B1.2.1. Evenredige Vrachtverdeling	181
B1.2.2. Vrijwillige toerbeurt Noord-Zuidverkeer	182
B1.2.3. Uitbreiding van de toerbeurtsystemen	183
B1.3. Rijnvaart	184
B1.4. Regelingen	186
B1.4.1. Sloopregeling	186
B1.4.2. Stillegregeling	187
Bijlage 2. Rhône-Saône-Rijnverbinding	189
B2.1. Inleiding	189
B2.2. Verbetering van de Rhône	190
B2.3. Verbetering van de Saône	197
B2.4. De Saône-Rijnverbinding	197

1. INLEIDING

Bij het beschouwen van de geschiedkundige ontwikkeling van de binnenscheepvaart, als onderdeel binnen de gehele infrastructuur, werpt zich onmiddellijk de vraag op of deze langzame wijze van transport nog wel in onze geheel op snelheid ingestelde eeuw past.

Aangezien Nederland van oudsher een waterrijk land is, lag het voor de hand dat men het aanwezige water in de vorm van rivieren en meren ging gebruiken als transportweg. Tot aan het begin van het industriële tijdperk vormde het transport te water dan ook de enige mogelijkheid om op grote schaal goederen te vervoeren.

In die tijd zien we ook dat de binnenschepen zich volledig aanpassen aan de zogenaamde natuurlijke vaarwegen. De trajekten die door één en hetzelfde schip bevaren moesten worden waren dan ook vaak lang en zeer uiteenlopend van karakter. De binnenschepen voeren niet alleen op de grote rivieren, maar veelal tot in de kleine rivieren en kreken. Dit had veelal tot gevolg dat een schip zeer oneconomisch afgeladen moest worden om op de gewenste plaats te kunnen komen.

De industrialisatie met zijn behoefte aan grote hoeveelheden grond- en brandstoffen, alsmede de opkomst van de stoomboot gaven aan de ontwikkeling van de binnenvaart een extra stimulans.

Tegelijkertijd zien we echter ook het spoorwegtransport opkomen, welke al spoedig een grote konkurrent voor de binnenscheepvaart bleek te zijn.

De spoorwegen volstonden namelijk niet met de aanleg van aan- en afvoerwegen naar en van de grote rivieren, maar begonnen al spoedig met de aanleg van spoorlijnen langs de rivier, soms zelfs aan beide zijden ervan. Bekende voorbeelden zijn te zien bij de Mississippi, de Ganges en de Rijn.

Voor de scheepvaart op de Mississippi leverde dit een moordende konkurrentiestrijd op, waarbij door ingrijpen van de overheid ten aanzien van tariefbepalingen een min of meer kunstmatig evenwicht werd verkregen. Voor de Ganges had deze konkurrentieslag echter de ondergang van de rivierscheepvaart tot gevolg, welke zich nog steeds niet heeft kunnen herstellen. Ook voor de Rijn heeft de strijd door ingrijpen een zeker evenwicht bereikt; het personenvervoer is geheel overgenomen door de spoorwegen, het stukgoederenvervoer is gemengd over beide transportmogelijkheden, terwijl voor het massagoederen vervoer in sterk overheersende mate de scheepvaartweg blijft prevaleren

Had men aanvankelijk slechts de beschikking over natuurlijke waterlopen, in de loop der tijden zijn er daarnaast door verschillende oorzaken veel kunstmatige waterlopen ontstaan voor de meest uiteenlopende doeleinden. Zo zijn er veel vaarten en kanalen aangelegd, bijvoorbeeld in veengebieden en droogmakerijen, of als verdedigingswerken, afwateringskanalen, trekvaarten enz. Maar ook kanaalverbindingen tussen win-, productie- en verbruikersgebieden. Een voorbeeld is het in de jaren dertig aangelegde Twentekanaal, dat toen gezien werd als schakel in het kolentransport vanuit Limburg naar het industriegebied Twente.

Door de aanleg van deze nieuwe kanalen, alsmede door een voortdurende verbetering van bestaande, veelal natuurlijke, vaarwegen en de onderlinge aansluiting van diverse regionale kanalenstelsels, is een uitgebreid net van min of meer goed bevaarbare waterwegen tot stand gekomen.

Het na de Eerste Wereldoorlog beginnend, maar pas na de Tweede Wereldoorlog echt goed op gang gekomen wegvervoer is een nieuwe konkurrent voor de binnenscheepvaart geworden. Ten aanzien van het korte afstand vervoer, waarbij de ton-kilometerprijs een ondergeschikte rol speelt in vergelij-

king met de kosten van één- of meerdere malen extra overslag, heeft het wegvervoer, met zijn mogelijkheden ten aanzien van huis aan huis vervoer, het vervoer te water praktisch weggevaagd. Toch ging het door Ford indertijd gedane voorstel om de kanalen dicht te gooien en deze in autostrada te herscheppen te ver. Op de middelange afstanden is er weliswaar een scherpe concurrentie waarbij het wegvervoer, vooral ten aanzien van stukgoederen, tot voor kort nog steeds terrein won. Met de opkomst van o.a. containers is dit niet langer het geval. Op de lange afstand is de invloed van het wegverkeer nog relatief klein indien er goede scheepvaartverbindingen aanwezig zijn. Toch zal de moderne scheepvaartondernemer in de toekomst de klant een steeds meer compleet 'transportpakket' (van deur tot deur) moeten aanbieden, wil hij de concurrentie de baas blijven. De vervoerskosten van een container over zee vormen maar 30% van de totale vervoerskosten. Het vervoer over land naar en van de haven neemt 20% voor zijn rekening. Het laden, lossen en overslaan vergt verder nog 30% terwijl de overige 20% administratiekosten e.d. zijn.

Naast het wegverkeer is er voor de binnenscheepvaart ook nog concurrentie ontstaan door het zogenaamde buistransport, thans nog in hoofdzaak gebruikt voor het transport van olieprodukten, maar ook steeds meer voor transport van olie en ertsen (het zogenaamde slurry-transport). In Noord-Amerika heeft deze wijze van transport een zeer grote vlucht genomen, maar ook in Eurpa valt een sterke toename te constateren.

Ondanks al deze concurrentie kan ten aanzien van het huidige transport op de binnenwateren worden opgemerkt, dat dit over het algemeen, althans in absolute zin nog steeds stijgende is. In percentage van het totale binnenlandse transport was op vele plaatsen enige afname te constateren. Bij toenemende brandstofkosten en veiligheidseisen zou dit nog wel eens kunnen omslaan.

Door de opkomst van het industriële tijdperk met zijn grote toename in vervoer zijn de vervoerskosten een steeds belangrijkere rol gaan spelen, met als gevolg een vraag om grotere en vooral ook snellere schepen. De scheepvaartwegen moesten zo mogelijk worden aangepast, terwijl bovendien tot het uiterste gebruik gemaakt moest worden van de mogelijkheden die de bestaande vaarwegen boden.

Betere kennis van deze vaarwegen vormt een eerste vereiste voor de binnenscheepvaart, wat voor natuurlijke vaarwegen niet alleen om bestudering van de veelal plaatselijke rivierproblemen vraagt, maar ook om het geven van informatie over alle vaarwegen aan de scheepvaart.

Aanpassing van de vaarwegen aan de steeds groeiende eisen van de scheepvaart is in de eerste plaats een economisch vraagstuk. Dit is de reden waarom een dergelijke aanpassing veelal stap voor stap tot stand komt, al naar gelang de economie dit rechtvaardigt.

Bij het beschouwen van de mogelijkheden en de aantrekkelijkheden van de binnenscheepvaart spelen in de eerste plaats de typische eigenschappen van het schip en de scheepvaart een rol.

De meest kenmerkende eigenschap van een schip is de gelijkmatige ondersteuning door de opwaartse druk van het water, waardoor een relatief goedkope konstruktie en een praktisch vrijwel onbeperkte mogelijkheid tot vergroting van de laadkapaciteit. De nuttige lading is groot ten opzichte van het dood gewicht. Beperking van het laadvermogen is dus niet in de eerste plaats een konstruktief vraagstuk, maar een restriktie van de te bevaren vaarweg.

Voor binnenvaartschepen betekent deze restriktie veelal een minder gunstige konstruktie door de relatief kleine diepte. Indien deze verhouding te ongunstig zou uitvallen kan men overwegen om kleinere eenheden te nemen welke, indien mogelijk, tot grotere eenheden worden samengesteld (duwkonvoien).

In hoofdstuk 2 zullen de verschillende typen binnenvaartschepen met hun ontwikkeling en specifieke gebruik worden behandeld. Ook wordt enige aandacht besteed aan de scheepskarakteristieken, zoals voortstuwingsmiddelen, stuurinrichtingen en de daarmee samenhangende vaareigenschappen.

In direkt verband hiermee staan de eigenschappen van de waterwegen zelf en de mogelijkheden om deze aan te passen aan de eisen die de scheepvaart hieraan stelt. Het schip beweegt zich namelijk door het medium water, waarbij de weerstand die het schip in het water ondervindt zeer sterk bepaald wordt door de vaarsnelheid van het schip zelf en door de beperking van het aanwezige natte dwarsprofiel van de vaarweg.

In hoofdstuk 3 zal deze interactie tussen een schip en zijn vaarweg met de daarmee gepaard gaande hydraulische verschijnselen, zoals retourstroom, waterspiegeldaling en scheepsgolven nader worden behandeld.

Een vaarwegennet is, zoals reeds eerder genoemd, opgebouwd uit natuurlijke vaarwegen (zeeën, meren, rivieren) en kunstmatig gegraven vaarwegen (kanalen voor zee- en/of binnenscheepvaart). Kunstmatig gegraven vaargeulen in natuurlijke vaarwegen (Nieuwe Waterweg, Euro-geul, enz.) en gekanaliseerde rivieren vormen een soort overgang tussen beide eerder genoemde typen.

In hoofdstuk 4 zullen de kunstmatige scheepvaartwegen worden behandeld, speciaal het vereiste dwarsprofiel ten aanzien van bevaarbaarheids- en manoeuvreereisen op de rechte vaarwegvakken en in de bochten. In het kort zal worden ingegaan op het tracé en het lengteprofiel.

In hoofdstuk 5 zullen daarna de natuurlijke scheepvaartwegen aan de orde komen waarbij - in tegenstelling tot de kunstmatige vaarwegen - het tracé en het lengteprofiel praktisch opgelegde randvoorwaarden vormen, terwijl het dwarsprofiel slechts in beperkte mate kan worden beïnvloed.

In vele gevallen zal de natuurlijke vaarweg niet kunnen voldoen aan alle eisen in verband met de aanwezige topografie (te klein dwarsprofiel, te sterk verhang) of de geologie (stroomversnellingen ten gevolge van rotsdremfels). Ook de klimatologie en de hydrologie spelen hierbij een grote rol (ijs, langdurige droogte in de tropen).

Voor de meeste gebreken van een aanwezige vaarweg is wel een remedie te vinden, maar dit kost bijna altijd zeer veel geld. In de praktijk zal daarom veelal gezocht worden naar oplossingen binnen zogenaamde multipurpose projecten (hoogwaterbestrijding, waterkracht, waterhuishouding waaronder irrigatie, scheepvaart, enz.). Hierdoor hoeven de kosten van de aanleg of verbetering van een vaarweg niet allen te drukken op de scheepvaart.

In bijlage 1 wordt nader ingegaan op bestaande regelingen in de binnenvaart, waarbij vooral de marktstructuur en de positie van de particuliere binnenschipper daarin de aandacht krijgen.

Tenslotte wordt in bijlage 2 een voorbeeld gegeven van een multipurpose project middels de Rhône-Saône-Rijnverbinding.

2. SCHEPEN VOOR DE BINNENVAART

2.1. Indeling van de binnenvaart

Zoals het voor de verkeerskundige van belang is om enig inzicht te hebben in de eigenschappen van de vervoersmiddelen, zo is het ook voor de (verkeers)waterbouwkundige die belast is met ontwerp, uitvoering en beheer van havens en scheepvaartwegen van belang om enig inzicht te hebben in schepen en scheepvaart.

Er zijn verschillende indelingen van de binnenvaart (Engels: inland navigation) mogelijk, bijvoorbeeld naar vaartrajekt, naar scheepsgrootte of naar scheepstype. In de komende paragrafen zal een inventarisatie van de verschillende voorkomende scheepstypen worden gegeven, waarbij ook de ontwikkeling hiervan in de tijd aan de orde zal komen. Hierbij wordt alleen de **beroepsvaart** bekeken, terwijl hiervan het praktisch te verwaarlozen personenvervoer (dus het passagiersschip en eventueel het zeilend bedrijfsvaartuig) buiten beschouwing wordt gelaten. Voor informatie over de **recreatievevaart** wordt verwezen naar het kollegedictaat Watersport [2]. Voorts wordt voornamelijk gekeken naar de situatie in West-Europa.

Een bekende verdeling van het goederenvervoer is die naar nationaal (binnenlands) en internationaal (grensoverschrijdend) vervoer. Het merendeel van de Nederlandse vloot neemt aan beide deel.

In het **nationale goederenvervoer** nam in 1982 de binnenvaart 68,4 mln ton (6,2 mld tonkm) voor haar rekening, de spoorwegen 5,7 mln ton (1 mld tonkm) en het merendeel ging over de weg: 357,8 mln ton (17,9 mld tonkm). In het **internationale goederenvervoer** werd in 1982 door de binnenvaart 172,8 mln ton vervoerd (naar, van en via Nederland), waarvan 51% met de Nederlandse vloot. In dat jaar bedroeg het internationale goederenvervoer over de weg 49 mln ton, over het spoor 12,5 mln ton, door de zeevaart 299 mln ton, door de luchtvaart 0,3 mln ton en met de pijpleiding 41 mln ton.

Tabel 2.1 geeft een vergelijking van de vervoersafstanden waarop de diverse vervoersmiddelen zijn ingezet voor het jaar 1983. Tabel 2.2 geeft verder een gedetailleerd overzicht naar vervoerde goederen voor het jaar 1979.

vervoers- middel	lokaal vervoer		interregionaal binnenlands vervoer		internationaal vervoer	
	gelost	geladen	gelost	geladen	gelost	geladen
binnenvaart	22,4	22,4	47,6	47,6	33,5	75,3
vrachtauto	246,0	246,0	87,7	87,7	26,1	28,0
spoor	0,7	0,7	4,5	4,5	3,7	5,4
zeevaart					215,8	66,7
pijpleiding					1,5	32,7

Tabel 2.1. Ladingen en lossingen in Nederland in 1983 (mln ton)

Goederengroep			binnenlands	grensoversch.	
	1981	1983		1979	1983
Landbouwprodukten	14,0	3,4	5,4	7,5	6,6
Andere voedingsmiddelen		10,1	6,9	13,1	12,8
Vaste brandstoffen	3,3	4,5	1,0	11,8	11,5
Aardolie en aardolieprodukten	8,9	6,7	11,7 (13%)	36,3	30,2 (17%)
Ertsen	0,8	0,9	0,6	32,5	39,9 (22%)
Metalen en halffabrikaten	0,7	0,5	0,6	10,6	12,6
Zand en grind	45,1	37,2	51,3 (69%)	29,5	35,0 (19%)
Andere ruwe mineralen, bouwmat	4,2	3,3	5,3	11,4	11,5
Meststoffen		2,1	2,3	7,4	7,5
Chemische produkten	2,0	1,9	1,4	11,4	10,1
Overige produkten		0,6	0,8	4,4	3,5
Totaal		71,2	87,1 (100%)	175,8	181,2 (100%)

Tabel 2.2. Vervoerde goederen per binnenschip in Nederland in 1979 (x 1000 ton)

Zoals uit het bovenstaande blijkt is de betekenis van de binnenvaart voor Nederland vrij groot. Onze zeehavens, en met name Rotterdam, beschikken via een uitgebreid vaarwegennet tot ver in het Europese achterland over de mogelijkheid tot aan- en afvoer van goederen per binnenschip. Deze geografische situatie is, in de onderlinge concurrentieverhoudingen tussen de West-Europese zeehavens, van zeer groot belang. Ter illustratie enige cijfers:

De totale overslag in 1981 in de Rotterdamse haven bedroeg 250,4 mln ton. Bij 122,7 mln ton (ofwel zo'n 50%) was de binnenvaart betrokken. Indien men de overslag van ruwe olie, die nagenoeg geheel per pijp of zeeschip wordt af- en/of aangevoerd, buiten beschouwing laat, wordt dit aandeel zelfs 75%. Ongeveer 180.000 Rijn- en binnenvaartschepen doen jaarlijks de Rotterdamse haven aan. Een goed funktionerende binnenvaart is voor de haven van Rotterdam, een transitohaven bij uitstek, een zeer belangrijke voorwaarde.

In het **binnenlands vervoer** wordt onderscheiden:

- **Tankvaart.** Dit is een aparte markt, die voor een groot deel in handen is van de rederijen.
- **Droge lading.** Domineert, 61,7 mln ton tegen 9,5 mln ton door de tankvaart in 1983. Het binnenlands vervoer van droge lading is in Nederland juridisch geregeld in de Wet Goederenvervoer Binnenscheepvaart (WGB). Deze wet, die overigens de tankvaart buiten beschouwing laat, maakt onderscheid tussen:
 - **Eigen vervoer.** Hiervoor geldt een registratieplicht. Voornamelijk zand- en grindvaart (ca. 90% van het vervoerd gewicht). Ongeveer 10% van de vervoersprestatie geschiedt met huurschepen.
 - **Beroepsvervoer.** Hiervoor is een vergunningenstelsel van kracht. Ruwweg 50% van het droge ladingvervoer. Schepen die in het eigen vervoer werkzaam zijn mogen niet deelnemen aan het beroepsvervoer. Het beroepsvervoer is onderverdeeld in:
 - **Wilde vaart.** Ongeregeld, voor ca. 75% via de Evenredige Vrachtverdeling (alleen zand- en grindvaart niet).
 - **Bijzonder vervoer.** Om één of andere reden vrijgesteld van de vracht-

verdelingsplicht, voornamelijk zand- en grindvaart.

- **Campagnevaart.** Vaak seizoengebonden, bv. suikerbietencampagne.
- **Beurtvaart.**

Dit wettelijk onderscheid sluit aan bij de deelmarkten, die in de binnenlandse markt zijn te onderkennen. De WGB voorkomt, dat de ondernemers in de binnenvaart vrij van de ene (binnenlandse) deelmarkt naar de andere kunnen gaan. De binnenlandse markt is dus vergaand gereguleerd. Tabel 2.3 geeft een indicatie van de verdeling over de belangrijkste vormen van vervoer van droge lading.

Het vervoer van **zware transporten** neemt verder een bijzondere plaats in.

Goederengroep	Wilde vaart	Bijzonder vervoer	Eigen vervoer	Totaal
Agrarische produkten	11528	9	1575	13112
Vaste brandstoffen	4476	-	1	4477
Ruwe mineralen en fabrieken; bouwmaterialen (waarvan zand en grind)	6947 (5523)	6296 (3954)	27248 (23525)	40491 (33002)
Overige goederen	1691	50	51	1792
Totaal	24642	6355	28875	59872

Tabel 2.3. Binnenlands vervoer van droge lading (x 1000 ton) in 1983 exclusief beurt- en campagnevaart

In het **internationale vervoer** kan voor wat betreft de belangrijkste deelmarkten een onderscheid worden gemaakt in:

- **De Rijnvaart.** Dit is de vaart op de Rijn, waarop de Akte van Mannheim (uit 1868) van toepassing is, en haar zijrivieren en kanalen. Deze Akte garandeert de vrijheid van vaart, reden dat door de overheden anders dan ten behoeve van de veiligheid van de vaart geen regels kunnen worden opgelegd. De Rijnvaart kan dan ook beschouwd worden als een internationale ongereguleerde markt met vrije prijsvorming, die bovendien de grootste markt is die de binnenvaart in Europa kent. De Rijnvaartmarkt wordt doorgaans zo ruim opgevat, dat alle vervoer per binnenschip van en naar de Duitse Bondsrepubliek daartoe gerekend wordt.
- **Het Noord-Zuidverkeer** op België en Frankrijk. Een gedeeltelijk gereguleerde markt met bodemtarieven en een toerbeurtsysteem op basis van vrijwilligheid en dus niet wettelijk geregeld. De Noord-Zuidmarkt omvat alle vervoer tussen Nederland, België en Frankrijk voorzover dat niet via de Rijn plaatsvindt.

De **ondernemingsstructuur** van de binnenscheepvaart omvat bedrijven van verschillende grootte, van de partikuliere binnenschipper tot grote rederijen. Zo varen op de Donau slechts rederijschepen, en zijn in het Rijnstroomgebied beide ondernemingsvormen te vinden. In België, Frankrijk en Nederland is er sprake van overwegend partikulieren. De Zwitserse Rijnvloot bevindt zich in handen van rederijen; de Franse Rijnvloot wordt slechts door één rederij vertegenwoordigd. De Duitse binnenvloot neemt een tussenpositie in.

Zoals gezegd nemen in Nederland de kleine scheepvaartondernemingen, de zogenaamde **partikuliere schippers** (zetschippers en eigen schippers), een

overheersende rol in. Gezamenlijk beschikken zij over ca. 80% van het totaal aantal schepen, dit is ca. 70% van het laadvermogen van de Nederlandse binnenvloot. Dit blijkt ondermeer uit het gemiddelde aantal schepen per onderneming (zie tabel 2.4).

De weinige grote Nederlandse **rederijen** zijn vooral actief in de tankvaart (hierin beschikken zij over ca. 90% van het laadvermogen), en voor het vervoer van droge lading in de internationale Rijnvaart met name in het ertsvervoer en kolenvervoer met duwstellen.

Het grote verschil tussen deze twee typen ondernemingen is dat de particuliere scheepvaart meer ambachtelijk is (van vader op zoon), terwijl de rederijen industrieel zijn uitgerust, kantoren in binnen- en buitenland hebben en vaak concerngebonden zijn (d.w.z. zich veelal ook op andere markten begeven).

In bijlage I zal nader worden ingegaan op de marktstructuur van de binnenvaart, en komen enkele bestaande regelingen aan de orde.

	Aantal ondernemingen	Schepen	
		aantal	laadvermogen (ton)
Droge lading ¹⁾ :	3913:	4816:	3.751.000:
- Beroepsvervoer	- 3577	- 4199	- 3.285.000
- Eigen vervoer	- 380	- 617	- 466.000
Tankvaart	48	172	216.000

Tabel 2.4. Nederlandse ondernemingen en schepen die in 1984 hebben deelgenomen aan het binnenlands vervoer

¹⁾ een onderneming met meerdere schepen kan aan beide vormen deelnemen.

Een voor de hand liggende indeling van de binnenvaartuigen is die **naar scheepsgrootte**; in verband met het brengen van meer eenheid in de afmetingen van de vaarwegen is men in Europees verband overgegaan tot de in tabel 2.5 weergegeven **klasse-indeling**.

kl.	type	lengte (m)	breedte (m)	diep- gang (m)	hoogte ledig (m)	laadver- mogen (ton)
0	kleinere vaartuigen					< 300
I	Spits (Peniche)	38,50	5,00	2,20	3,55	300
II	Kempenaar	50,00	6,60	2,50	4,20	600
III	Dortmund-Eemskanaalschip	67,00	8,20	2,50	3,95	1000
IV	Rijn-Hernekanaalschip	80,00	9,50	2,50	4,40	1350
V	Groot Rijschip	95,00	11,50	2,70	6,70	2000
VI	Duwvaart	185,00	22,80			

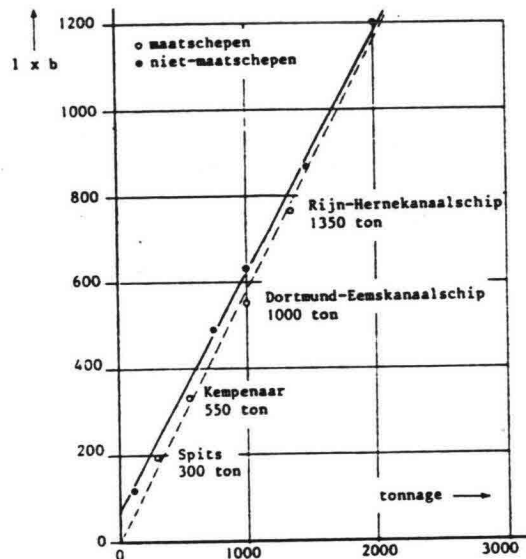
Tabel 2.5. Standaardschepen waarop de klasse-indeling is gebaseerd

Dit houdt in dat een vaarweg van een bepaalde klasse in ieder geval toegankelijk is voor vaartuigen met de bij die klasse behorende standaardlengte en -breedte. Hierbij is onder andere uitgegaan van de CEMT-indeling

(Commission Européenne des Ministres de Transports) uit 1954.

Er wordt gepleit om naast deze klassen nog een vaarwegklasse V-super in de Europese normering op te nemen, met als belangrijkste kenmerk minimale sluisafmetingen van $12 \times 190 \text{ m}^2$. Dit met het oog op de kleine duwvaart: met twee duwbakken of met een koppelverband (duwend motorschip en één bak) in gestrekte formatie.

De afmetingen van de schepen worden niet zozeer bepaald door konstruktieve eisen, maar door de aangeboden partijgrootten van de te vervoeren producten (bv. containers), en vooral door de afmetingen van vaarwegen en kunstwerken. Bij de klasse-indeling van de vaarwegen is voornamelijk de lengte en de breedte (en in mindere mate de kruiphogte) van de toe te laten schepen bepalend, en dus niet de diepgang. Deze kan immers worden gevarieerd al naar gelang de hoeveelheid ingenomen lading. De vaardiepte op de kleinere rivieren is overigens veelal beperkt, waardoor de variatie in de diepgang van de schepen zeer gering is. Uit figuur 2.1 blijkt dan ook dat het laadvermogen van de schepen ongeveer recht evenredig is met het oppervlak (lengte x breedte) van de schepen.



Figuur 2.1. Verband tussen laadvermogen en lengte x breedte

Door de Commissie Vaarwegbeheerders [82] zijn voor de vaarwegklassen I t/m IV de in tabel 2.6 vermelde afmetingen van de maatgevende schepen voorgesteld. Hierbij is de strijkhogte bepaald uit metingen van bestaande schepen; de gekozen hoogte wordt door 10% van de ongeladen schepen in de betreffende klasse onderschreden.

In tabel 2.6 staan tevens de richtlijnen voor de doorvaarthogte en doorvaartwijdte van vaste bruggen. De aanbevolen minimum doorvaarthogte is gelijk aan de som van de strijkhogte en een schrikhoogte van ca. 30 cm. De aanbevolen minimum doorvaartwijdte geldt slechts indien er twee doorvaartopeningen worden toegepast, en er sprake is van rechte vaarwegvakken.

Met het oog op de verkeersveiligheid wordt aanbevolen om vaste bruggen bij voorkeur uit te voeren zonder middenpijler. De bevaarbare breedte tussen de pijlers in het kielvlak van het schip moet dan gelijk zijn aan de breedte die op het aansluitende vaarweggedeelte aanwezig is.

CEMT klasse	MAATGEVEND SCHIP			VASTE BRUG	
	lengte	breedte	strijk- hoogte	doorvaart- hoogte	doorvaart- wijdte
I	39	5,10	5,00	5,30	8,50
II	55	6,60	6,00	6,30	10,50
II	55/67	7,20	6,30	6,60	11,00
III	67/80	8,20	6,30	6,60	12,00
IV	85	9,50	6,75	7,00	14,00

Tabel 2.6. Maatgevende schepen en richtlijnen voor de afmetingen van vaste bruggen (maten in m)

Het geven van algemeen geldende richtlijnen voor de doorvaarthoogte van een beweegbare brug in gesloten stand is niet mogelijk; de te kiezen doorvaarthoogte is immers van invloed op zowel de investeringskosten als op het aantal keren dat de brug open moet (en daarmee op de wachtkosten van enerzijds het wegverkeer en anderzijds het landverkeer), en zou middels een kosten-baten analyse kunnen worden bepaald. Wel verdient het aanbeveling om er rekening mee te houden dat de meeste motorjachten een strijkhoogte lager dan 2,5 à 3 m hebben.

Bij het vaststellen van de doorvaartwijdte van het beweegbare deel van een beweegbare brug kunnen globaal dezelfde maten als die in tabel 2.6 worden aangehouden. Eventueel kan hierop een reductie worden toegepast indien de brugopening in de as van de vaarweg ligt, of indien er weinig scheepvaart te verwachten is.

In zijn algemeenheid geldt dat, wanneer de doorvaartopening van een brug of combinatie van bruggen lang is ten opzichte van de lengte van het schip, er een grotere doorvaartwijdte moet worden gekozen dan bij korte doorvaartopeningen.

Het natte dwarsprofiel dient ter plaatse van de doorvaartopening in verband met zuigingsverschijnselen zo weinig mogelijk te worden gereduceerd. Aanbevolen wordt om het natte dwarsprofiel ter plaatse van een brug niet meer dan tot 85% van het aanbevolen vaarwegprofiel te beperken. De aanbevolen diepte van de vaarweg dient over de gehele breedte tussen de pijlers aanwezig te zijn.

In dit hoofdstuk zal verder een onderverdeling van binnenvaartuigen **naar type** worden gehanteerd, omdat dit het best aansluit bij de ontwikkeling van de binnenvaart in de tijd. Hierbij wordt voornamelijk naar de situatie in West-Europa gekeken. Onderscheiden worden achtereenvolgens:

- * Schepen zonder eigen voortstuwing, te weten
 - sleepschepen en
 - duwbakken.
- * Schepen met eigen voortstuwing, te weten
 - sleepboten (binnen- en havensleepboten),
 - motorvrachtschepen (voor droge lading, motortankschepen, containerschepen, RoRo-schepen en zeegaande binnenschepen), en
 - duwvaart (in Amerika en in Europa).

Kenmerkend voor de binnenvaart is thans dat naast nieuwe, geheel aan de moderne eisen beantwoordende typen schepen, ook nog vele oudere scheeps-

typen voorkomen. Deze worden in de geïndustrialiseerde landen geleidelijk weggesaneerd of gemoderniseerd, maar komen in ontwikkelingslanden nog in grote getale voor. Een aanzienlijk deel hiervan bestaat nog steeds uit motorloze sloopboten die gezeild, gevoerd, geboomd of met volkomen verouderde motorboten gesleept worden (de Afrikaanse cano, de Z.O.-Aziatische kojang, de Chinese jonk enz.).

2.2. Schepen zonder eigen voortstuwing

2.2.1. Sleepschepen

In het begin van deze eeuw bestond er een zeer groot aantal typen sleepschepen (of sleeplichters), afhankelijk van de vaarwateren waarin zij opereerden. Vaak was het type aangeduid door de naam van een kanaal, rivier of landstreek.

De in tabel 2.5 genoemde klasse-indeling was in eerste instantie dan ook bedoeld om in deze veelheid enige orde te scheppen. Omdat de voordelen duidelijk waren (lagere bouwkosten, snellere levering, grotere efficiency) werd deze **standaardisering** vrij snel algemeen doorgevoerd.

Voor de kleinere schepen was de **scheepsvorm** niet van zo heel veel belang. Hoofdzaak was een groot laadruim en een groot laadvermogen bij een maximum diepgang (Spits, Kempenaar). Voor de grote, in lange slepen varende schepen was de weerstand, en dus de scheepsvorm, wel van belang (Dortmund-Eemskanaalschip, Rijn-Hernekanaalschip, Rijnaak). Er zijn vroeger ook al sleepproeven met modellen gedaan om gunstige vormen vast te stellen.

Naast het slepen werd, na de introductie van de dieselmotor, ook wel de zogenaamde **opduwer** toegepast. Dit was een klein bootje met een dieselmotor van gering vermogen (22 à 35 pk), slechts geschikt om één schip voort te bewegen (een 34 pk motor kon een schip met een laadvermogen van 1000 ton met een snelheid van 5 km/h opduwen). De voordelen hiervan ten opzichte van een sleepboot waren dat er geen sprake was van extra weerstand door het schroefwater tegen het voort te bewegen schip, en dat deze oplossing meestal goedkoper was dan het laten inbouwen van een motor in een oud sleepschip. De opduwer werd met name toegepast op ondiepe kanalen (in de noordelijke provinciën).

Een andere mogelijkheid, die men voornamelijk in het rivierengebied tegenkwam, was de toepassing van een **zijschroef**. Deze werd meestal via een (scharnierende) lange as aangedreven door een in het gangboord opgestelde kleine dieselmotor. De schroef kon men zo naar believen naast het schip laten zakken.

Tabel 2.7 toont de situatie vlak voor de tweede wereldoorlog. Door de ontwikkeling van de duwvaart en ombouw tot motorschepen (zelfvaarders) is het aantal sleepschepen thans tot een fractie teruggebracht van dat in de jaren '20 en '30. Na 1940 werden er al weinig sleepschepen meer gebouwd. Door de te lange omlooptijd van de sleepvaart (ca. 2 maal zo lang als van een zelfvarend motorschip) werden vooral in de 60-er jaren veel sleeplichters omgebouwd tot motorschip.

Slepen komt nu alleen nog maar sporadisch voor en slechts over korte afstanden; er is eerder sprake van "langsij" duwen naar de plaats van bestemming. Voorzover nog in gebruik worden de sleepschepen voor een klein gedeelte aangewend voor het vervoer van voornamelijk granen (en bij speciale schepen ook wel van zand, grind en baggerspecie), doch voor het

overige doen zij dienst als "drijvende" buffer, voornamelijk voor de opslag van granen. Voor de laatste komen uiteraard alleen nog de grotere typen in aanmerking.

	aantal schepen	laadvermogen (x 1000 ton)
sleep	7700	3200
zeil	3300	265
zeil + motor	119	12
opduwer	1600	146
zijschroef	500	91
motor	6500	710
stoom	280	43
totaal	20100	4500

Tabel 2.7. Verdeling van de binnenschepen in Nederland naar wijze van voortbewegen (mei 1940)

Per 1 januari 1985 waren er in Nederland nog 535 sleepscheepen. Dit aantal is de afgelopen jaren vrijwel gelijk gebleven omdat sleepscheepen voor verladers relatief gunstig zijn om in overligdagen te houden (d.w.z. als opslagruimte gehuurd kunnen worden); dit kan enkele honderden guldens per dag schelen met een gewoon motorschip.

2.2.2. Duwbakken

Bakken voor de duwvaart zijn voornamelijk ontwikkeld in Amerika. Pas aan het eind van de 50-er jaren werd de duwvaart geïntroduceerd op de West-Europese vaarwegen.

In 1970 werd officieel een standaardisatie van de bakken voor de Rijnvaart overeengekomen die daarvoor officieus ook al werd gehanteerd: de zogenaamde Europa-bakken (zie tabel 2.8). Deze standaardisatie gaat overigens veel verder dan alleen de afmetingen; bv. ook de plaatsing van lieren en bol-ders is vastgesteld.

Kenmerkend is de afwezigheid van ruimschotten. De bakken zijn dubbelwandig uitgevoerd in afzonderlijke secties van ca. 9 m lengte.

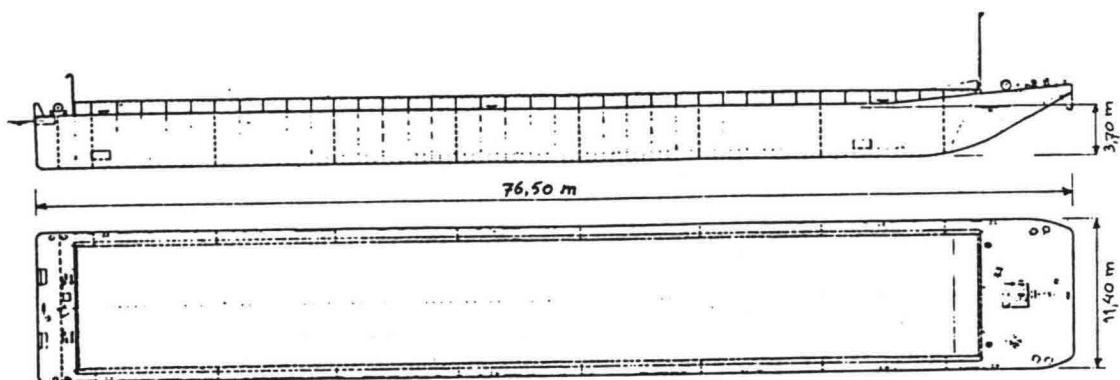
Type	lengte (m)	breedte (m)	diepgang (m)	laadvermogen (ton)	eigen gewicht (ton)
Europa I	70,00	9,50	3,20	1700	270
Europa II	76,50	11,40	3,20	2240	370
Europa IIA	76,50	11,40	3,70	2565	400

Tabel 2.8. Standaardafmetingen van duwbakken

Aanvankelijk werd gevaren met het type Europa I; de maten hiervan zijn afgestemd op de zijkanalen van de Rijn. Later groeiden de afmetingen tot die van de Europa II - waarbij de breedte aangepast is voor de 12 m brede sluizen - en vermeerderde de diepgang (Europa IIA). De bakken zijn eventueel af te dekken, bijvoorbeeld bij het vervoer van granen.

Sinds 1984 zijn er ook speciale bakken in de vaart voor het transport van containers. Deze zijn 90 m lang en 12 m breed (inwendig 10 m breed zodat er 4 rijen containers naast elkaar kunnen staan; 4 hoog gestapeld betekent dit een capaciteit van 196 TEU). Bij een maximale diepgang van 4,35 m heeft zo'n bak een tonnage van 3725 ton. Overigens zal in verband met de waterstanden op de rivieren meestentijds niet met deze grote diepgang gevaren kunnen worden.

In Italië, waar men over minder vaardiepte beschikt, is men bezig met de ontwikkeling van een (lichtere) polyester bak. De Amerikaanse bakken zijn kleiner (meestal 60 m lang, 9 m breed en 3,3 m diep met een laadvermogen van ca. 2000 ton) omdat de sluizen in de midden- en bovenloop van de Mississippi en in de Ohio kleiner zijn dan die in de Rijn. Ook is de verscheidenheid aan typen groter dan in Europa, omdat bijna al het vervoer over water in Amerika met duwvaart wordt gedaan.



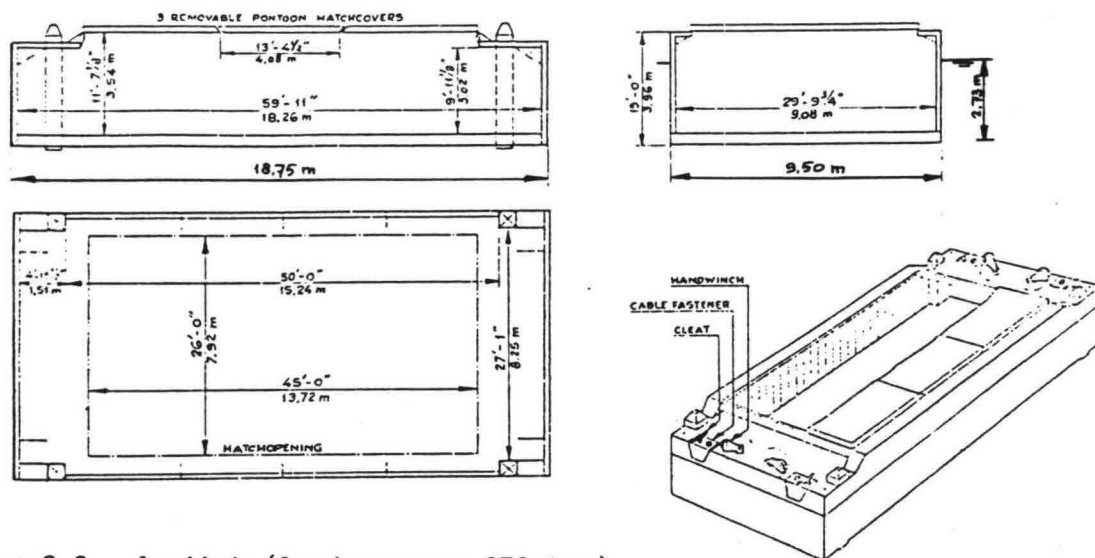
Figuur 2.2. Duwbak type Europa IIA

Naast de overweging om in Europa (en dan met name op het traject Rotterdam-Ruhrgebied) van vierbaks naar zesbaks duwvaart over te gaan, heeft men plannen gehad om de thans toegepaste Europa IIA te vervangen door een vergrote standaardbak, bijvoorbeeld met afmetingen 90 x 14 x 3,50 m (3500 ton) of 100 x 14 x 3,85 m (4200 ton). Dit zouden dan de Europa III bakken moeten worden. Men komt dan uit tussen de oude vierbaks en de bepleite zesbaksformatie qua capaciteit en blijft met vier bakken varen. Het grootste bezwaar hiervan is dat hiermee afgestapt wordt van de genormaliseerde maten, waardoor schutsluizen, brugopeningen en laad- en lossystemen (die nu nog op een bakbreedte van 11,4 m berekend zijn) moeten worden aangepast. Bovendien zijn de nu in gebruik zijnde bakken nog te nieuw om al te worden afgeschreven. Voor beide voorstellen is overigens een wetswijziging nodig in verband met de toegestane grootte van een duweenheid.

Een geheel ander soort duwbakken zijn de **duwbakken die rechtsstreeks vanuit een zeeschip** te water kunnen worden gelaten, waarna een duweenheid kan worden geformeerd. Het economisch voordeel van deze bakken ten opzichte van de andere duwbakken bestaat uit een beperking van de overslagtijd en de daaruit voortvloeiende kosten. Een voorbeeld van zo'n bak is de **Lashbak** (Lighter Aboard Ship).

De uitwendige maten van de Lashbakken houden verband met breedtevoorschriften van het Europese vaarwegennet. Voor de lengte daarvan werd vrijwel het tweevoud gekozen. Langer mochten de bakken niet worden omdat

dan het moederschip (waar de bakken haaks in gaan) te breed zou worden voor het huidige Panamakanaal.



Figuur 2.3. Lashbak (laadvermogen 370 ton)

Wegens de grote nadelen (grote weerstand tijdens varen, zeer gevoelig voor golven zoals deze in het Nederlandse deltagebied voorkomen, ongunstige verhouding eigen gewicht/laadvermogen, moeilijk koppelsysteem e.d.) wordt de Lashbak in Europa nauwelijks nog toegepast.

2.3. Sleepboten

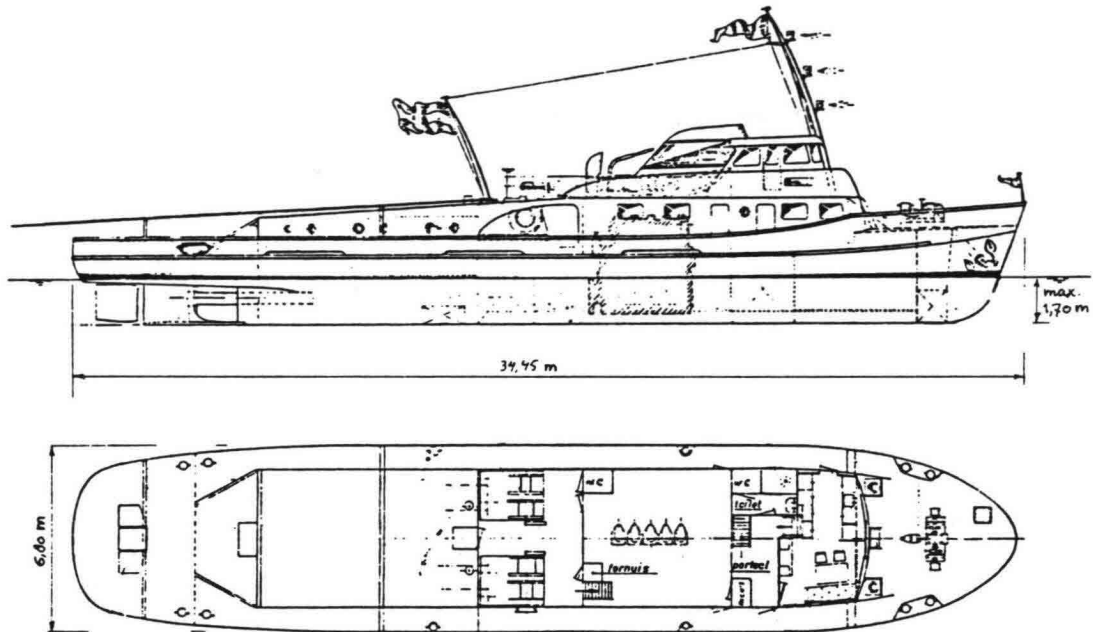
2.3.1. Binnensleepboten

Doordat men langs de betrekkelijk smalle Europese rivieren en kanalen veel jaagpaden heeft gemaakt waarlangs de schepen werden "gejaagd" door mensen of trekdieren (een sleepmethode dus), is bij de introductie van de stoomvaart (1816: het eerste stoom(passagiers)schip op de Rijn, de "Prinz von Oranien") haast vanzelfsprekend de trekkende boot ontstaan. De "Hercules" was in 1821 één van de eerste stoomsleepboten op de Rijn. Vooral na 1841, toen men overging op de bouw van (grotere) ijzeren in plaats van houten sleepschepen, heeft de sleepvaartmethode zich verder ontwikkeld en zijn vele proeven genomen om de voortstuwingseigenschappen van sleepboot zowel als lichter en de combinatie daarvan in de sleep te verbeteren. Pas na de Tweede Wereldoorlog is men tot het inzicht gekomen dat "het paard achter de wagen spannen" in de binnenscheepvaart op de Europese rivieren geen verslechtering maar een verbetering betekende.

Aanvankelijk bood, in verband met de geringe diepgang en de nog onderontwikkelde sloopschroef, het scheprad de oplossing als voortstuwert. De sleepboten werden breed en zwaar door de langzaam lopende stoommachines en de ketels. Daardoor werden zij ook lang. De grote imposante radersleepboten zijn echter in aanzienlijke aantallen gebouwd. Op de Rijn was er in 1970 nog één grote radersleepboot met stoommachine te zien, de "Oscar Huber". Deze is nu nog als museumship in Ruhrort te bezichtigen.

De sterk verbeterde eigenschappen van de sneldraaiende schroeven van kleine diameter (tot 2 m) en beter inzicht in de werking van schroeven in tunnels en straalbuizen bij toepassing op schepen voor ondiep water onder

verschillende bedrijfsomstandigheden, hebben in de jaren tussen de eerste en tweede wereldoorlog geleid tot een algehele invoering van de schroef-sleepboot. De ontwikkeling van de dieselmotor heeft hiertoe bijgedragen. Men vindt dan ook vrijwel alleen nog motorsleepboten (zie bijvoorbeeld figuur 2.4). Zij zijn lichter te bouwen dan radersleepboten en daardoor kleiner, terwijl ook met een kleinere bemanning kan worden volstaan.



Figuur 2.4. Motor-schroefsleepboot "Logi" (1956) t.b.v. Rijnvaart
(1 schroef, ca. 600 pk) [NB: 1 pk = 0,7354 kW]

Het vermogen en de afmetingen van de verschillende sleepboten loopt zeer uiteen. Eén der grootste Nederlandse binnensleepboten had een vermogen van 2580 pk bij een lengte van 60,80 m, een breedte van 10,09 m en een diepgang van 1,52 m. Om inzicht te krijgen in het benodigde vermogen van sleepboten kan tabel 2.9 dienen; het laadvermogen van een sleep kan oplopen tot zo'n 10.000 ton.

Globaal geldt dat 1 pk motorvermogen korrespondeert met 100 à 150 N trekkracht. Deze waarde kan echter sterk afhankelijk zijn van de sleepboot en de wijze van aandrijving.

Traject	Aantal tonnen per pk
zee - Roergebied	5 à 6
Roergebied - Salzig	4 à 5
Salzig - Bingen	2 à 2,5
Bingen - Mannheim	5 à 6
Mannheim - Karlsruhe	4 à 5
Karlsruhe - Straatsburg	2 à 2,5

Tabel 2.9. Aantal tonnen lading dat per pk bij normale waterstand stroomopwaarts op de Rijn gesleept kan worden

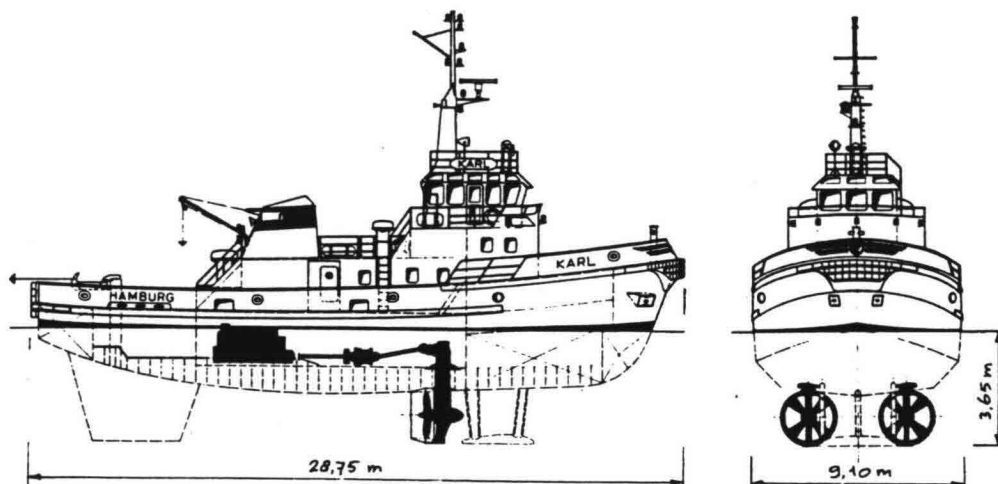
Vaak werden een aantal sleeplichters tot één sleep geformeerd, welke dan door één sleepboot getrokken werd. De lengte van zo'n sleep kon op de Rijn wel 1500 m bedragen. Het manoeuvreren met een dergelijk konvooi was zeer moeilijk; een sleep kan bijvoorbeeld niet stoppen op het motorvermogen van de sleepboot. Bovendien kan slechts met zeer geringe snelheid worden gevaren (3 à 5 km/h) omdat anders wegens het ontbreken van een schroefstraal de kracht op het (grote) roer van het sleepschip te groot zou worden.

Hierom, en om de grote arbeidsintensiteit, heeft de sleepvaart de afgelopen decennia haar marktaandeel bijna geheel verloren aan de moderne motorvrachtvaart en duwvaart. Van de nog overgebleven sleepboten zijn vele nu uitgerust met duwknieën, zodat zij als duwboot kunnen worden gebruikt.

Het wegvallen van de sleepvaart heeft mede tot gevolg gehad dat de grote binnensleepboten met hun geringe diepgang gaan verdwijnen. Deze sleepboten werden in het verleden echter steeds ingezet als ijsbrekers op de rivieren (met versterkte neus). Deze taak kan niet worden overgenomen door zee- en havenslepers in verband met hun te grote diepgang. Er zijn wel een aantal proeven gedaan met duweenheden, waarbij de bakken op het ijs werden geschoven.

2.3.2. Havensleepboten

Havensleepboten worden toegepast in havens en havenmonden voor het assisteren en opslepen van zeeschepen. Soms wordt met de neus geduwd. Na de stoomsleepboten werden er aanvankelijk motorsleepboten met een normale schroef toegepast, al dan niet in combinatie met een straalbuis. Omdat er op dieper water wordt gevaren is één schroef meestal voldoende. Deze moet dan wel van vrij grote diameter zijn, zodat deze schepen achter vaak een grotere diepgang kregen dan voor.



Figuur 2.5. Boegseerboot "Karl" (1976) t.b.v. haven van Hamburg (2 Schottel Propellers, 2320 pk, paaltrekkracht 360 kN)

- Eisen** die aan een havensleepboot gesteld moeten worden zijn ondermeer:
- een grote trekkracht bij lage snelheid,
 - zeer goede stabiliteit,
 - vrijvarend redelijk snel,
 - goede wendbaarheid en manoeuvreerbaarheid.

Dit resulteerde in korte, brede schepen met vrij grote diepgang, en leidde bovendien tot de ontwikkeling van speciale schepen voor het assisteren van zeeschepen, soms aangeduid met het germanisme "boegseerboot" (Duits: Bug-sierboot). Dit zijn sleepboten met een vaak 360° draaibare voortstuwcr in het midden- of voorschip in plaats van in het achterschip (eerst voorname-lijk Voith Schneider Propellers, later ook Schottel Propellers). Voordelen hiervan zijn dat langszij van een zeeschip afgemeerd toch naar alle kanten stuwdruc kan worden geleverd, maar vooral dat tijdens het slepen door de trekkracht aan de beting (ongeveer halverwege het schip) en de stuwkracht een koersstabiliserend koppel wordt geleverd in plaats van een koersafwij-kend koppel. Hierdoor kan de boegseerboot kleinere afmetingen hebben dan de normale schroefboot.

Voor de boegseerboten geldt globaal een verhouding motorvermogen (pk) : paaltrekkracht (kN) = 1 : 0,15.

2.4. Motorvrachtschepen

2.4.1. Motorvrachtschepen voor droge lading

Ongeveer gelijktijdig met de stoomsleepboot werd het stoomvrachtschip ontwikkeld. In het achterschip, soms iets meer naar voren vanwege de gewichtsverdeling, werd de stoommachine ingebouwd. De lengte van deze schepen varieerde van ca. 30 tot 80 m. De kleinere schepen voor de beurt-vaart tussen de steden hadden een laadvermogen van ca. 100 ton, tegen ca. 1000 ton voor de grotere, die op de Rijn en de Maas voeren. De zogenaamde luikboten waren de bekendste; deze voeren zowel op de Rijn als op de Maas. Dit type schip was voorzien van laadbomen.

Veel van deze schepen werden na 1945 omgebouwd tot motorschip. Deze ver-bouwing was alleszins de moeite waard, omdat deze schepen van een sterke konstruktie waren, terwijl de verbouwing niet zo'n grote ingreep was. Een bijkomend voordeel was de winst aan laadruimte. Een stoomschip had voor het voortstuwingsmiddel twee ruimten nodig, namelijk één voor de machine en één waarin de ketels en de kolenbunkers stonden. Bij een motorschip bespaarde men één ruimte.

Tot de 60-er jaren was er in vergelijking tot de zeevaart in Nederland weinig onderzoek (in tegenstelling tot Duitsland); schepen gingen over van vader op zoon, en werden meestal met eigen geld gefinancierd.

Het lag voor de hand om, in navolging van de duwvaart, na te gaan of de bestaande motorschepen en vroegere sleeplichters tot een duweenheid konden worden verenigd. Voor kleinere eenheden bleek zo'n koppverband voordeli-ger te zijn dan een eenheid met duwboot. Het duwende motorvrachtschip heeft dan ook meer en meer toepassing gevonden.

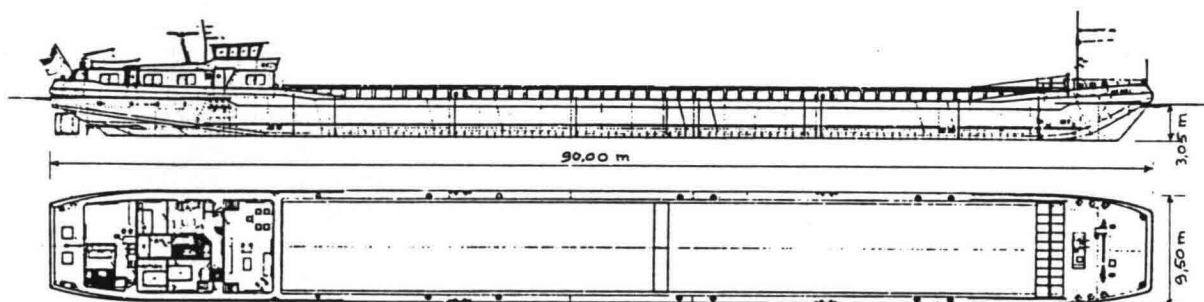
In de 70-er jaren was de olie nog steeds goedkoop, maar werd het lading-aanbod groot. Hierdoor werden zeer volle schepen gebouwd, met grote beno-digde motorvermogens. Zo was er na 1970 de tendens om schepen van 85 x 9,5 x 3,0 m te bouwen met een tonnage van 1400 à 1600 ton. Deze schepen werden ook als duwend motorschip gebruikt. Voor de Rijnvaart werden schepen ge-bouwd met maximale afmetingen 110 x 11,4 x 3,0 m met een tonnage van 2200 ton. Deze afmetingen worden onder andere opgelegd door de sluizen in de Boven-Rijn.

In 1975 zijn nieuwe motorschepen ontwikkeld tot 4250 ton met de volgende kenmerken: pontonvormig, doorgaande laadruimen, beweegbaar stuurhuis, boegstuurinrichting. Hun diepgang wordt beperkt door de waterstand op de Rijn, waardoor ze vaak niet volbeladen kunnen varen.

In de 80-er jaren komt er vraag naar zuiniger schepen; bovendien is een

beter inzicht in de exploitatie vereist, omdat de financiering nu in de meeste gevallen via banken geschiedt.

Ten aanzien van motorvrachtschepen voor het massagoederentransport streeft men er naar éénruimsschepen te bouwen met gladde wand. Het voordeel hiervan is dat de kans op beschadigingen kleiner is en er sneller geladen en gelost kan worden dan bij schepen met meerdere ruimen. Voorts wordt steeds vaker rekening gehouden met de mogelijkheid om containers te vervoeren. Dit betekent dat enkele standaardmaten moeten worden aangehouden voor de ruimen, en er extra verstevigingen moeten worden aangebracht. Bovendien is een beweegbare stuurhut en een boegschroef een vereiste. Verder maakt men de nieuwe schepen in veel gevallen geschikt om met één of meer bakken of met een ander motorschip een koppelverband te vormen.



Figuur 2.6. Motorvrachtschip "Henri" (1974) t.b.v. Rijnvaart
(laadvermogen 1837 ton; 2 schroeven, 1350 pk)

Het (partikuliere) motorvrachtschip is vooral aantrekkelijk voor vervoer dat niet op vaste plaatsen en/of in beperkte partijgrootten wordt aangeboden. De 'redelijke' concurrentiepositie is voor een groot deel veroorzaakt door het feit dat de partikuliere binnenschipper vaak zonder matroos vaart, en zijn vrouw als (onbetaalde) part-time kracht funktioneert.

2.4.2. Motortankschepen

In West-Europa gelden internationaal aanvaarde **voorschriften** voor de veiligheid bij het transport van chemische produkten en aardolieprodukten over water. Bij het opstellen van reglementen en voorschriften is één van de belangrijkste principes dat **gevaarlijke stoffen** niet mogen worden vervoerd, tenzij dit vervoer uitdrukkelijk is toegestaan, waarbij de toestemming is onderworpen aan bepaalde voorwaarden.

Algemeen aanvaard is de VBG (bepalingen betreffende het Vervoer over de Binnenwateren van Gevaarlijke stoffen). Dit omvat het reglement betreffende het onderzoek van vaartuigen, alsmede het reglement voor het vervoer van gevaarlijke stoffen over de Rijn, het ADNR (Accord Européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Navire sur le Rhin). Voorts wordt in de VBG verklaard dat de voorschriften van het ADNR ook van toepassing zijn op de binnenwateren. Het ADNR geeft door middel van voorschriften aan:

- de indeling van de diverse stoffen in gevarenklassen,
- de bouwwijze van het transportmiddel, en
- de vervoersvoorwaarden van de stof.

Voor het vervoer van verpakte goederen of van losgestorte goederen kan elk binnenschip worden gebruikt, mits het vaartuig voldoet aan de bepalingen van het ADNR met betrekking tot de te vervoeren stoffen. Voor het vervoer van **onverpakte vloeistoffen en gassen** worden bepaalde geschikte schepen (tankers) gebruikt, die aan aanvullende voorschriften zijn onderworpen.

Tankvaart en droge ladingvaart zijn in het goederenvervoer per binnenschip geheel gescheiden markten, daar schepen van de ene markt ongeschikt zijn om deel te nemen aan het vervoer op de andere (deel-)markten.

De binnentankvaart is van jongere datum dan het stukgoederen- en massagoederentransport. In de 30-er jaren nam de sleeptankvloot nog toe, maar na 1955 kwamen al spoedig oliepijpleidingen in gebruik, waardoor een verdere ontwikkeling in de binnentankvaart werd afgeremd. Wel wordt het zelfvarend olietankschip, al dan niet met voorgebonden olielichter, tamelijk veel gebruikt.

Voor asfalt, zware olie en chemicaliën zijn er verwarmingsinstallaties aan boord, bestaande uit spiralen in de tanks en een ketel die meestal in het achterschip is geplaatst. De ontwikkeling gaat de laatste jaren in de richting van tankschepen voor speciale ladingen, zoals vloeibare zwavel en vloeibare gassen. Meestal zijn de tankschepen echter ingericht voor vervoer van aardolieprodukten van ruw tot geraffineerd. Veel van deze olie-soorten hebben een laag vlampunt of zijn vluchtig en explosief.

Men gebruikt wel de volgende **type-onderverdeling**, naar globale gebruiksmogelijkheid:

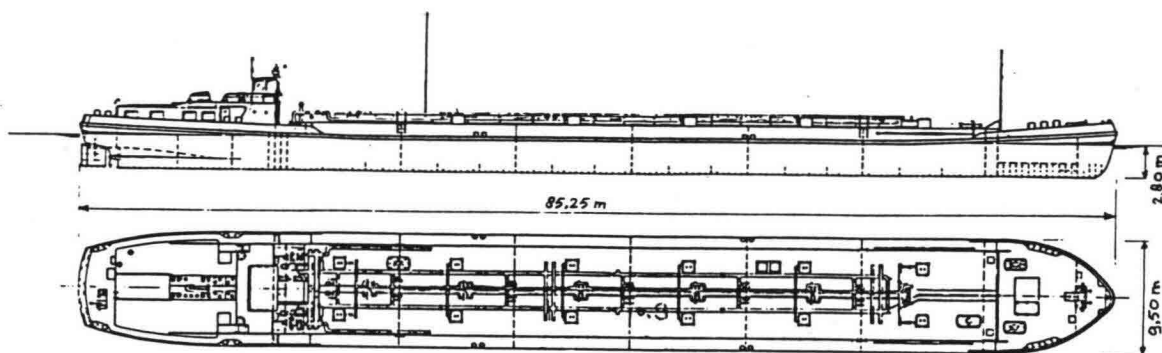
1. Gastanker
2. Chemicaliëntanker
3. Benzinetanker
4. Gasolietanker
5. Stookolietanker

De typen 1, 2 en 3 zijn de zogenaamde "gesloten typen", d.w.z. ook bij het laden en lossen. Deze moeten "onder klasse" worden gebouwd (met tussenkomst van een klassebureau). Van de typen 1 en 2 zijn nog maar weinig schepen gebouwd. De meeste tankschepen zijn van type 3; naast benzine kan hiermee ook gasolie, nafta, sommige zuren en stookolie worden vervoerd.

De hoeveelheid lading wordt meestal uitgedrukt in tonnen. Omdat het soortelijk gewicht nogal per soort lading kan verschillen, is het belangrijk om te weten waarvoor het schip gebruikt gaat worden. Gasolie heeft per ton bijvoorbeeld een veel groter volume dan sommige zuren. Globaal geldt de verhouding $\text{ton} : \text{m}^3 = 1 : 1,3 \text{ à } 1,5$.

Per 1 januari 1983 bestond ca. 7% van de actief aan het vervoer deelnemende Nederlandse binnenvloot uit tankschepen. Ruim de helft hiervan had een laadvermogen groter dan 1000 ton. Bijna 90% van het totale laadvermogen is in handen van de rederijen (waarbij wel bedacht moet worden dat sommige rederijen niet veel groter zijn dan een partikuliere onderneming).

Er wordt meestal in **kontinuuvaart** gevaren, hetgeen blijkt uit het feit dat ongeveer een kwart van de vervoersprestatie door de Nederlandse binnenvloot op rekening van de tankvaart komt. Het dag en nacht doorvaren wordt overigens voor een groot deel verklaard uit de aanschaffings- en exploitatiekosten van een tankschip: deze kunnen soms wel het dubbele bedragen van de kosten van een "gewoon" motorvrachtschip met eenzelfde laadvermogen.



Figuur 2.7. Motortankschip "Dordrecht 21" (1971)
(laadvermogen 1525 ton, tankinhoud 2035 m³; 1 schroef,
800 pk)

2.4.3. Containerschepen

Een **container** is in feite een aluminium doos waarvan de afmetingen zijn gestandaardiseerd:

- breedte 8 ft = 2,44 m
- hoogte 8 ft = 2,44 m
- lengte 20 ft = 6,10 m, maximum gewicht 20 ton (TEU = twenty feet equivalent unit)
- 30 ft = 9,14 m, maximum gewicht 25 ton
- 40 ft = 12,14 m, maximum gewicht 30 ton (FEU = forty feet equivalent unit).

De ontwikkeling van de containervaart kwam, nadat in 1966 de eerste schepen met deze gestandaardiseerde kratten uit de V.S. aankwamen, zeer aarzelend op gang. De binnenvaart toonde slechts weinig belangstelling en was bovendien te langzaam om te concurreren met het weg- en railvervoer: een omloop Keulen-Rotterdam-Keulen duurde in deze begintijd maar liefst 14 dagen. De eerste stap was het retourvervoer van lege containers vanuit Duitsland naar Rotterdam.

Ondertussen heeft de binnenvaart toch een vaste plaats in deze bedrijfstak weten te veroveren, en kan het containervervoer zelfs als **groei**markt voor de binnenvaart aangemerkt worden. Op de Rijn werden er in 1977 ruim 40.000 containers verscheept. In 1980 waren dit er 80.000 en in 1984 werden er in Rotterdam al 179.300 TEU via de binnenvaart afgehandeld. Voor 1985 verwacht men dat dit al opgelopen zal zijn tot 238.000 TEU. De in Rotterdam aangeboden containers zullen dan voor 18% over het water worden vervoerd, voor 5% over het spoor en voor 77% over de weg (in 1982 nog 10, 15 en 75%).

Om op succesvolle wijze containervaart te kunnen bedrijven, dat wil zeggen om te kunnen concurreren met het weg- en railvervoer, zijn de belangrijkste voorwaarden **betrouwbaarheid** en **regelmaat**. Dit vereist een goede organisatie, waarbij ook samenwerking met andere vervoerstechnieken van belang is. De verlader is er immers zeer in geïnteresseerd wat er met de container gebeurt wanneer deze is gelost.

Eén en ander heeft tot gevolg gehad dat de containervaart, inclusief voor en natransport, hoofdzakelijk in handen is van rederijen. Deze onderhouden **vaste lijndiensten** tussen voornamelijk de zeehavens Rotterdam, Amsterdam en Antwerpen, en de Duitse Rijnhavens tot Basel. Buiten dit Rijnstroomgebied lijkt de containervaart nauwelijks interessant.

Verder kan de binnenvaart alleen concurreren indien er veel containers over een **grote afstand** vervoerd worden. Alleen dan kunnen de kosten van de extra overslaghandelingen (ten behoeve van het voor- en natransport) worden gekompenseerd door de besparing op brandstof- en personeelskosten. Tot voor kort werd de minimale kostendeckende vervoersafstand tussen Rotterdam en de ontvangende terminal nog op 600 à 700 km geschat. Het ontvangende bedrijf moest bovendien niet verder dan 50 km van de terminal liggen. Op het ogenblik (mei 1985) worden die afstanden geschat op 500 respectievelijk 100 km.

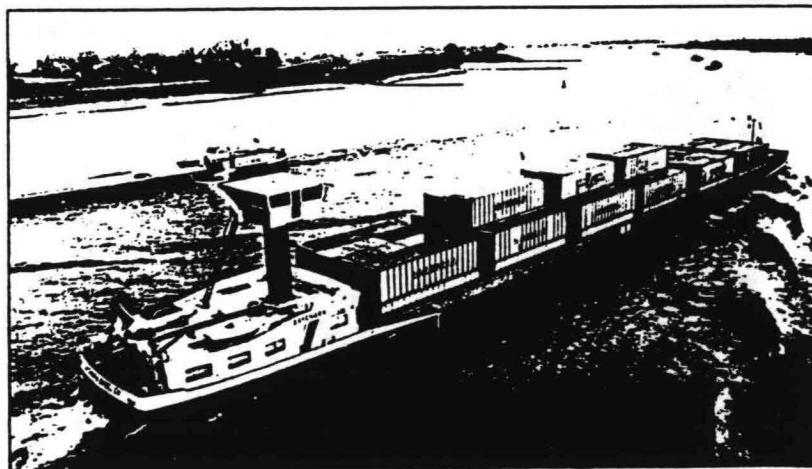
Uiteraard moeten in de havens de **benodigde terminals** aanwezig zijn waar deze overslaghandelingen verricht kunnen worden. Steeds meer havens worden van deze faciliteit voorzien.

Het **aantal** containers dat per keer meegenomen kan worden neemt toe. Steeds vaker worden koppilverbanden toegepast met een totaal laadvermogen van ca. 150 TEU of meer. Voorts kan door de toepassing van een beweegbare stuurhut tegenwoordig drie of meer lagen hoog worden gestapeld (mits de onderdoorvaarthoogte van de bruggen dit toelaat).

Voor de Rijn worden de laatste jaren grote motorvrachtschepen van 108,50 tot 110 m lengte en 11,40 m breedte ontwikkeld, die als eenruimsschip met een 10 m breed laadruim 112 FEU (4 naast, 7 achter en 4 boven elkaar) of 224 TEU kunnen vervoeren.

Er zijn al speciale containerbakken voor de duwvaart in de vaart die 196 TEU mee kunnen nemen, en ook bestaat er al een ontwerp voor een 252 TEU containerschip (lengte 110 m, breedte 12 m en diepgang 2,9 m bij een laadvermogen van 3300 ton, met de beweegbare stuurhut op het voorschip).

Voorts is de **omloopsnelheid** beduidend groter geworden. De eerder genoemde omloop Keulen-Rotterdam-Keulen wordt nu twee keer per week afgelegd, zodat de verblijftijd van de containers op het binnenschip klein is ten opzichte van de drie weken die vaak met de zeereis gemoeid zijn. Bovendien valt de snelheid van het wegvervoer vaak tegen ten gevolge van verkeersopstoppingen, files en bijvoorbeeld het feit dat in Duitsland in de zomer op de autosnelwegen een zondagsrijverbod voor vrachtwagens van kracht is.



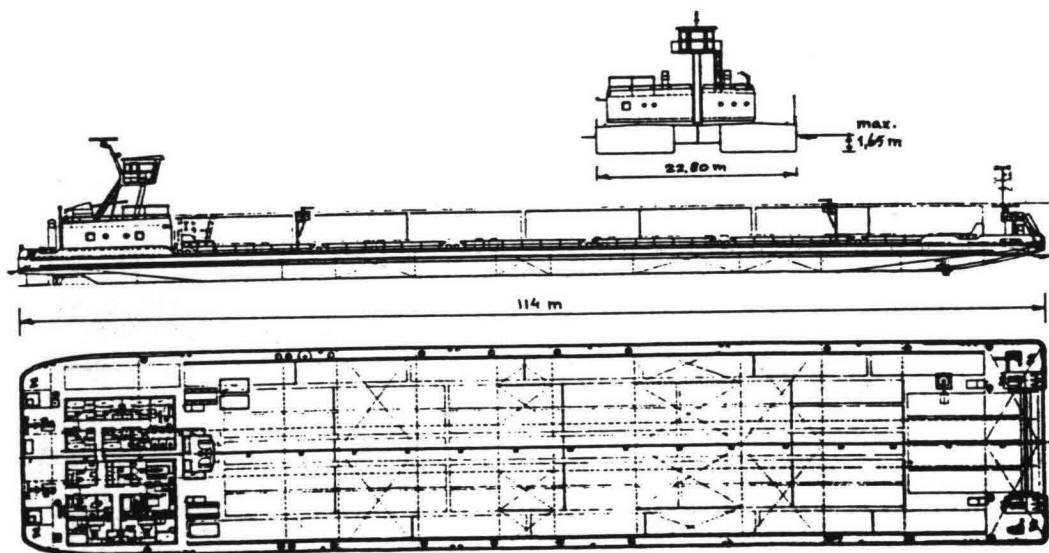
Figuur 2.8. Containerschip "Sayonara" (1982) 105 x 11,4 x 3,52 m (laadvermogen 2880 ton, 192 TEU of 96 FEU; 2 schroeven, 2280 pk; boegschroef; geschikt voor het varen in koppilverband)

Containerschepen hebben doorgaans sterke motoren en zijn uitgerust met moderne nautische apparatuur in verband met het varen in de Rijndelta-havens. Vaak is de stuurhut in de hoogte beweegbaar. Indien ook tankcontainers vervoerd worden moet voldaan worden aan de eisen van de ADNR. Een boegschroef is onontbeerlijk bij het aanleggen in verband met de grote windvang. Verder moet de schipper bij het laden en lossen bijzonder alert zijn; hij moet zelf in de gaten houden of het zwaartepunt van de lading op de goede plaats zit (i.v.m. de stabiliteit van het schip), dat bepaalde partijen separaat staan etc.

2.4.4. RoRo-schepen

Bij het "roll on roll off" systeem zet men een snelle vervoerdrager (bijvoorbeeld vrachtauto's of containers op opleggers) op een langzamere (het RoRo-schip). Voordelen hiervan zijn onder andere een besparing van brandstof- en personeelskosten en minder slijtage van de opleggers. Ten opzichte van het containervervoer bestaat het voordeel dat er niet zulke grote investeringen gemaakt hoeven te worden voor overslagfaciliteiten.

RoRo-transport wordt interessanter naarmate de overige infrastructurele voorzieningen meer te wensen over laten, zoals langs de rivier de Donau. In 1981 is dan ook een speciaal RoRo-schip ontwikkeld voor het transport van trailers op de Donau tussen Bulgarije en Duitsland (zie figuur 2.9). Het gaat om schepen van het katamarantype, waarvan de beide helften deelbaar zijn. Dit is nodig omdat er langs de Donau geen werf bestaat die in staat is schepen van deze grootte in zijn geheel te hellingen.



Figuur 2.9. RoRo-schip voor de Donau (1982)
(laadvermogen 49 trailers van 40 ft; 2 schroeven, 3060 pk;
boegschroef)

De op de Rijn varende RoRo-schepen zijn meestal omgebouwde containerschepen. Sommige schepen zijn zelfs voorzien van een hydraulisch in hoogte verstelbare boegklep om eventuele waterstandsverschillen op te vangen. Hierdoor kan nagenoeg aan elke kade worden geladen en gelost. Enkele terminals hebben overigens zelf al kaderamps, zodat deze verstelmogelijkheid niet nodig is.

In veel gevallen wordt een bak voor het motorschip gekoppeld. Men onderhoudt al vaste lijndiensten.

Verder zijn er op de Rijn al speciale autotransportschepen in gebruik om personenauto's van Keulen naar Vlissingen te brengen (700 stuks per schip), en zijn er RoRo-schepen bekend voor het vervoer van zware lading zoals het zware ladingsschip Simmental.

Het laadvermogen wordt meestal uitgedrukt in straatlengte (in meters, bij een standaard straatbreedte van 2,5 m), of in TEU.

2.4.5. Zeegaande binnenschepen

Om overslagkosten te besparen komt het steeds vaker voor dat kleine zeeschepen (coasters: gemiddeld 100 m lang en minder dan 4 m diepgang) hun lading ver de rivier op brengen (of halen), of omgekeerd dat met "zeewaardige" binnenvaarders het ruime sop wordt gekozen.

De eerste categorie heeft een zeer slechte koersstabiliteit op ondiep water, dus ook op de rivieren. Dit komt door de kleine lengte-breedte-verhouding, de ronde vorm van het onderwaterschip, de kleine roeruitslag en -oppervlak, en de aanwezigheid van slingerkielen. De enige aanpassing is eigenlijk een verlaagde brug. In het verleden zijn dit soort schepen bij vrij veel ongelukken op de rivier betrokken geweest. Veel van deze coasters krijgen dan ook geen vergunning om de Rijn te bevaren.

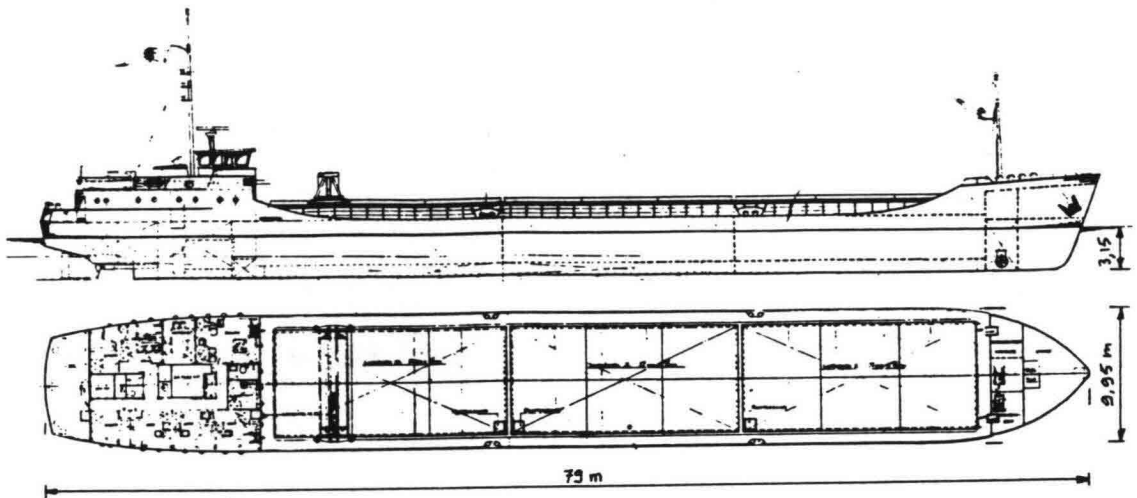
Bij nieuwbouw wordt hiermee rekening gehouden, en men ziet dan ook dat nieuwe coasters qua onderwaterschip meer op een binnenschip gaan lijken. Hierdoor is de tweede categorie ontstaan:

De zogenaamde **binnen/buitenvaarders** (kruiplijncoasters) zijn door de geringere diepgang en lagere kruiplijn geschikter om de binnenwateren te bevaren. Hierdoor kan met dit soort schepen de lading als het ware voor de deur worden opgehaald en afgeleverd. Het gaat hier om schepen met een laadvermogen van 1500 à 2500 ton en een lengte van 70 à 90 m. In het algemeen geldt een beperkte zeebrief, bijvoorbeeld tot een windkracht van 6 Beaufort en als vaargebied voor de gewone kustvaart: Oostzee, Noordzee (exclusief Ierland), Middellandse zee en de kuststrook van Frankrijk en Afrika (tot de evenaar).

Een bijzonder geval is de "Denemarkenvaart". Dit betreft een beperkt, vast omschreven vaargebied, waarbij niet hoeft te worden voldaan aan de algemene bemanningseis van minimaal 10 personen, maar met slechts 4 personen gevaren mag worden.

Meestal is de kapitein (vaak een ex-binnenschipper) ook de eigenaar, en vaart hij met vrouw en kinderen. In 1985 voeren er al ca. 50 binnen/buitenvaarders in Nederland, maar dit aantal groeit nog steeds. Een blijvend nadeel van dit type schepen op de binnenwateren ten opzichte van de gewone binnenschepen is het slechtere uitzicht door de hogere boeg.

Met speciale schepen worden er al containers van de Engelse oostkust naar Duisburg gevaren, en ook worden er al speciale autotransportschepen op dit traject in de vaart genomen. Begin '86 is verder de eerste Nederlandse kruiplijn-gastanker van stapel gelopen (de "Zephyr", afmetingen 92,5 x 11,4 m, een geladen diepgang van 2,84 m, 6 cilindrische ladingtanks met een totale inhoud van 2000 m³ oftewel 1240 ton vloeibaar gas, een hoofdmotor van 1000 pk, boegschroef).



Figuur 2.10. Binnen/buitenvaarder "Vlieland" (1982)
(laadvermogen 1495 ton, 1185 pk)

2.5. Duwvaart

2.5.1. Duwvaart in Amerika

Duwvaart is van Amerikaanse oorsprong. De ontwikkeling heeft hier vooral plaatsgevonden op de rivieren Mississippi, Ohio en Illinois, maar later ook op de Zuid-Amerikaanse rivieren zoals de Parana. De ontwikkeling van de duwvaart in de V.S. is puntsgewijs als volgt samen te vatten:

- Oorspronkelijk houten rechthoekige lichters van 40 à 50 ton, alleen voor dalvaart. Aan het eind van de tocht werd het hout van de lichter verkocht.
- Vraag naar goederentransport stroomopwaarts aanwezig. Er ontstaan kielboten van betere vorm; deze worden geboomd of getrokken. Later ook zeilboten.
- In 1811 eerste stoomboot "New Orleans" door Robert Fulton in Pittsburg gebouwd.
- In 1816 de "Washington" van Henry Shreve. Machinegewicht slechts 20% van dat van de "New Orleans" en het brandstofverbruik 60%. Maakt in de lente van 1817 een rondreis tussen Louisville en New Orleans in 41 dagen; deze tocht luidde de algemene toepassing van de stoomvaart op de Mississippi in.
- Schepen voor vracht en passagiers doen hun intrede. Deze "Packets" deden stroomop New Orleans tot St.Louis binnen vier dagen.
- Wegens de toepassing van voornamelijk hekraderen geen sleeptros mogelijk, waardoor duwen voor de hand lag. Daarom in 1865 Packets met grote knieën op de boeg om een lege packethull te duwen.
- In 1814 eerste boot op de Ohio, uitsluitend als duwboot. Periode van ontwikkeling duwvaart, met vallen en opstaan.
- In 1880 verhouding hekraderen : zijraderen = 3 : 1.
- In 1902 de grote Towboat "Sprague", ook wel Big Mamma genoemd, met afmetingen 84,2 x 18,6 x 2,26 m (1600 pk). Hekrader 12 x 12,2 m, 8 omw/min. Duwde een vlot van 56 bakken (totaal 54000 ton). Tot 1949 in dienst.
- Achterblijven van de aanvankelijke ontwikkeling door concurrentie van de spoorwegen in de jaren 20 (aandeel binnenscheepvaart slechts 2% van het totale verkeer).

- In 1928 wet aangenomen om de Mississippi op een breedte van minstens 300 ft (90 m) en een diepte van 9 ft bij laagwater (2,7 m) te brengen. In 1983 was ca. 80% van de werkzaamheden uitgevoerd.
- Na 1935 ontwikkeling technische verbeteringen aan binnenschepen: toepassing van elektrisch lassen, schroeven in straalbuizen etc.
- Sterke opkomst van moderne duwvaart. Na de jaren 30 ontwikkeling van verbeterde en gestandaardiseerde bakken. Onderzoek naar invloed van afmetingen, vorm en samenstelling van de duwbakken op de kostenfactor voor ton/mijl. Vrijwel alleen schroef-dieselduwboten.
- Veel verbeteringen later aan bestaande duwboten aangebracht. Hierdoor soms 2,3 x de oorspronkelijke stuwkracht.
- Thans nog weinig ontwikkeling, met uitzondering van bakken voor speciale ladingen (LPG, chemicaliën en dergelijke).



Figuur 2.11. Belangrijkste vaarwegen in de V.S.

De duwboten worden per type in aparte riviervakken ingezet. Aan het eind van zo'n vak worden de bakken uitgewisseld met die van een duwboot uit het volgende vak. Dit houdt verband met de verschillende omstandigheden op de riviervakken, waardoor er andere motorvermogens nodig zijn, en het aantal bakken dat per konvooi meegenomen wordt kan verschillen. Zo vaart men op de bovenrivier met duwboten met een vermogen van ca. 2500 pk die 4 à 6 bakken duwen, terwijl op de bredere benedenrivier soms wel 40 bakken worden meegenomen door duwboten met vermogens tot 10.000 pk en met vier schroeven.

Een "pushtow" op de Mississippi kan zo'n 50.000 ton lading vervoeren. De kop van het duwstel bevindt zich dan soms 400 m voor het stuurhuis. In verband met de manoeuvreerbaarheid wordt voor het konvooi soms een kort bakje gekoppeld waarin alleen een boegschroefinstallatie staat die vanuit de duwboot aan de achterkant van het konvooi kan worden bediend. Om zo'n konvooi varende te houden is een ploeg van 11 man nodig.

Er wordt continu doorgevaaren (ca. 20 vaaruren per dag en 4 uren voor het verwisselen van de bakken e.d.). In dalvaart wordt per dag ca. 320 km afgelegd tegen ca. 160 km in bergvaart.

Het konvooi wisselt onderweg steeds van samenstelling. Er wordt daarom voor de bedrijven centraal bijgehouden waar elke bak zich bevindt; elke duwboot meldt zich hiervoor enkele malen per dag om door te geven welke bakken hij bij zich heeft en waar hij zich bevindt.

Op diverse plaatsen langs de rivier zijn bakkenverzamelplaatsen gekreëerd. Een aparte duwboot verzorgt het voor- en natransport van de bakken en assisteert bij het verwisselen van de bakken.

Qua vervoerd tonnage staat de Amerikaanse binnenvloot bovenaan de wereldranglijst (naast de USSR; deze heeft overigens de modernste binnenvloot ter wereld, vrijwel alles is na 1945 gebouwd).

In 1982 werd over het vaarwegennet van de V.S. ruim 667 mln ton ruwe olie en aardolieprodukten (40%), steenkool (21%), bouwmaterialen (13%), graan en aanverwante produkten (11%), chemicaliën (7%) en ijzer- en staalprodukten (3%) vervoerd. Deze transportprestatie komt nagenoeg geheel voor rekening van de duwvaart, andere scheepstypen komen nauwelijks voor. De "barge and towing industry" van de V.S. omvat 1800 bedrijven met 180.000 werknemers. De vloot bestaat uit 4700 duw- en sleepboten in alle maten en grootten, 27.500 droge ladingbakken met een gemiddeld laadvermogen van 1257 ton en 4200 tankbarges met een gemiddeld laadvermogen van 2500 ton.

2.5.2. Duwvaart in Europa

De ontwikkeling van de duwvaart is in het kort als volgt te schetsen:

- Tussen 1930 en 1938 reeds op de Donau (met scherpe bochten en vele ondiepten) de duwboot "Uhu" in de vaart. Geen succes wegens te gering vermogen.
- Na de Tweede Wereldoorlog is de belangstelling ontstaan voor duwvaart na nadere kennismaking van de ontwikkeling in de V.S.
- In 1952 invoering van de duwvaart op de Wolga (een doorgaans brede rivier, bevaren door schepen met aanzienlijke laadvermogens).
- In oktober 1957 komt de eerste duweenheid op de Rijn in de vaart, met de duwboot "Wasserbüffel".
- Sedertdien heeft de duwvaart op de Rijn en andere rivieren in Europa een flinke vlucht genomen.

Het verschil met de Amerikaanse situatie zit hem vooral in de breedte, diepte en stroomsnelheid van de rivieren, en in het feit dat op de Rijn in de meeste gevallen de bakken vol stroomopwaarts en leeg stroomafwaarts worden geduwd, terwijl in Amerika dit precies andersom is.

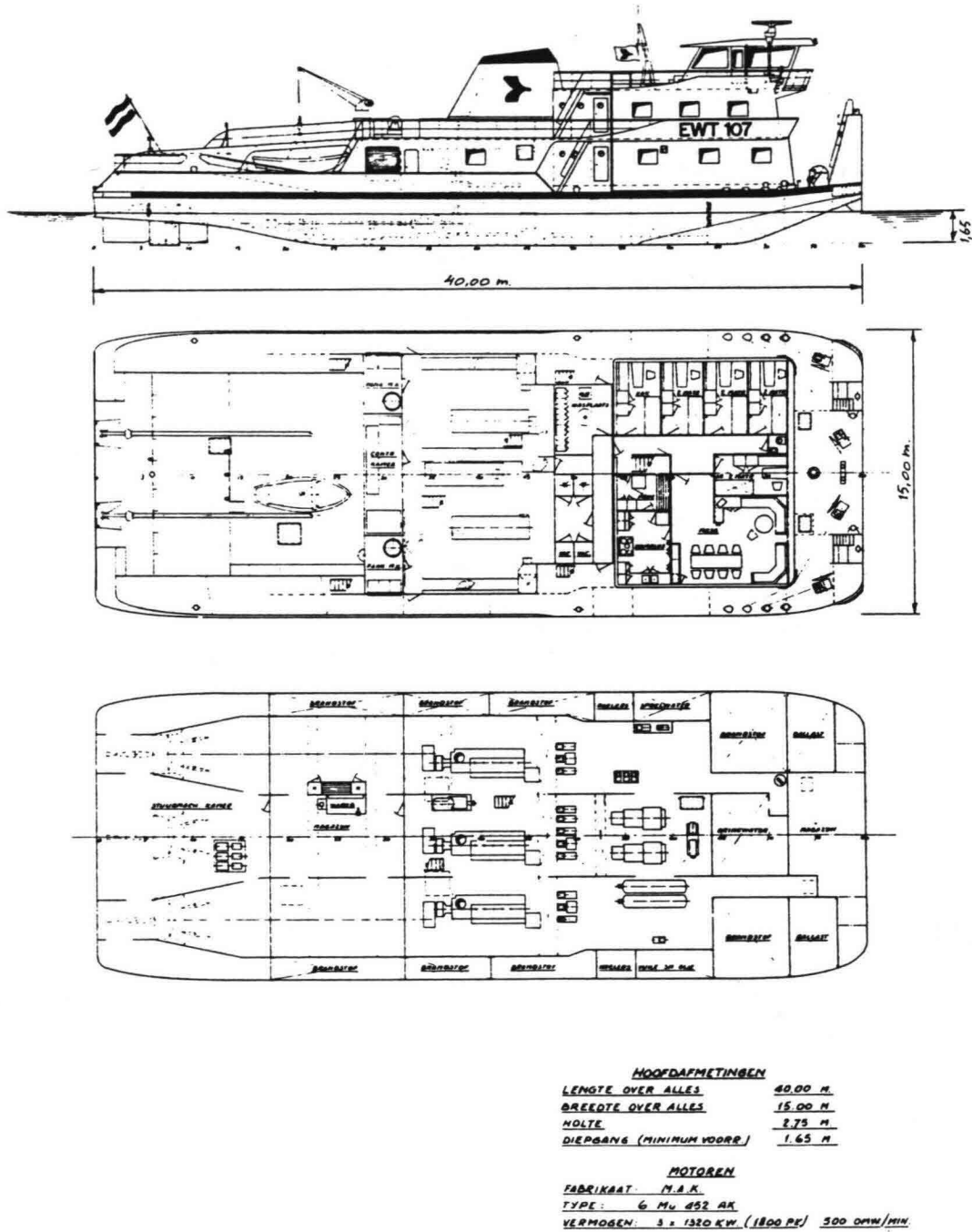
Als gevolg van de grotere breedte, de geringere stroomsnelheden en het dalwaarts gericht zijn van de goederenstroom, kunnen de duwkonvoeien op de Amerikaanse rivieren veel groter zijn dan op de Europese rivieren bij een ongeveer evengroot motorvermogen van de duwboten. Verder steken de Amerikaanse duwboten veel dieper (ca. 2,7 m tegen ca. 1,7 m voor een duwboot ten behoeve van de Rijnvaart). Daarom is de vorm van het onderwaterschip heel anders dan bij Europese duwboten. Bij duwboten met een geringere diepgang heeft het onderwaterschip wegens de grote schroefdiameter de vorm van een tunnelboog. In Amerika daarentegen kan de schroef vrij in het water steken.

De Europese duwboten, althans die op de Rijn, hebben een breedte die varieert van 10 tot 15 m en een lengte tussen de 15 en 40 m. Onderdeks bevinden zich de motorinstallatie, de gasolietanks en drinkwatertanks.

De bovenbouw, waarin de hutten voor de bemanning, staat trillingsarm op het schip. De stuurhut is tegenwoordig naar ergonomische inzichten ingedeeld, en voorzien van o.a. radarschermen, automatische stuurinrichting, draaisnelheidsmeters, roerhoekmeters, windsnelheidsmeters en marifoon; de meeste apparatuur is dubbel aanwezig.

In de holte in het achterschip bevinden zich de straalbuizen met de schroeven in tunnels. Ongeveer 1/3 deel van de schroef steekt boven de

waterspiegel uit. Om de manoeuvre-eigenschappen (vooral bij achteruit varen) te verbeteren zijn voor de straalbuizen flankingroeren aangebracht. Veel sleepboten zijn uitgerust met duwknieën, zodat zij ook als duwboot kunnen worden gebruikt.



Figuur 2.12. Duwboot "EWT 107" (1982) t.b.v. Rijnvaart
(3 schroeven, 5400 pk)

Elke dm aflaaddiepte betekent per bak een tonnageverschil van 80 ton (à f5,- per ton erts). Dit betekent dat men in de praktijk maximaal zal proberen af te laden, namelijk op de maatgevende waterdiepte (te voorspellen voor de ondiepste plaatsen van de rivier) minus de spiegeldaling en 0,25 m kielspeling. Bij recente proefnemingen op de Waal met 6 bakken is een spiegeldaling van 0,60 m gemeten.

Enkele algemene **voordelen** van de duwvaart boven de vaart met sleepschepen of motorschepen zijn:

- **Een besparing van personeelskosten.** Een motorschip, sleepschip of sleepboot dient, afhankelijk van de grootte, met 2 à 5 man bezet te zijn. In de duwvaart is voornamelijk de duwboot bemand; voor de behandeling van de bakken wordt bij vierbaks duwvaart met slechts twee man volstaan.

- **Een besparing van kapitaals- en onderhoudskosten.** De bakken zijn relatief goedkoop (aanschaf ca. 1 mln gulden) en simpel te onderhouden. Per duwboot zijn er meestal 3 stellen van 4 bakken nodig, waarvan er één stel in lading ligt, één gelost wordt en één onderweg is. Dankzij de standaardisering kan, indien meerdere duwboten op hetzelfde traject varen, in een "poule" worden gevaren, waarbij soms met slechts twee stellen per duwboot kan worden volstaan. De duurdere duwboot (ca. 10 mln) met bemanning ligt vrijwel nooit stil, de behandeling van de bakken in de haven wordt door goedkopere havenduwbotten verricht. Het rendement van een duwboot voor de vierbaks duwvaart ligt op 80 à 85%, d.w.z. 7000 à 7500 vaaruren per jaar. De rest van de tijd gaat verloren met onderhoud, reparatie, wachttijden bij bruggen, mist, koppelen van de bakken en feestdagen.

Ter oriëntatie: een droge lading schip van 1500 ton kost ca. 3 mln, een tanker van 2500 ton ca. 5 mln, een binnen/buitenvaarder 5 à 6 mln en een coaster van 2000 ton ca. 8 mln gulden.

- **Een besparing op energiekosten.** De verhouding motorvermogen : laadvermogen ligt bij een duweenheid vrij laag. Het schroefrendement ligt hoger dan bij motorvrachtschepen omdat ruimen en voortstuwingsmiddel gescheiden zijn, en de aanstroming van de schroeven daarom vrijwel onafhankelijk van de beladingsgraad is. Toch bedraagt het aandeel van de brandstofkosten in de totale jaarlijkse kosten zo'n 40% (ca. 4,5 mln gulden per jaar voor vierbaks duwvaart).

Als **nadelen** kunnen ondermeer worden genoemd:

- **Stilliggen is duur.** Duwvaart vereist een zeer goede organisatie van het vervoer, en is dan ook voor een groot deel in handen van rederijen. Overigens zijn er alleen al in Nederland ca. 80 kleine duwboten in de vaart in de particuliere sektor; hun marktaandeel bestaat doorgaans uit kleinere partijen, één of twee bakken, verkregen via de beurs. Ook doen zij veel dienst in het havenverkeer, omdat de kleine, particuliere duwvaart flexibeler (lees: goedkoper) is.

- **Hinder voor de overige vaart,** doordat een belangrijk deel van de motorschepen, met name de grotere, sneller vaart dan de duwstellen. Dit leidt tot oploopmanoeuvres waarbij voor de oplopende motorschepen tijdverlies optreedt. Hinder is er ook voor de schepen die geen continu-vaart bedrijven. Deze gaan, door gebrek aan overnachtingshavens, vaak op de rivier voor anker om te overnachten. Door de zuiging van passerende duwstellen kunnen de ankers worden losgetrokken. Hier staat tegenover dat een duweenheid meerdere schepen vervangt, en daardoor weer een ontlasting van de vaarweg betekent.

In tabel 2.10 komt duidelijk het verschil met de sleepvaart naar voren:

	sleepboot + 4 lichters	duwboot + 4 bakken
lengte	700 m	185 m
laadvermogen	9000 ton	11000 ton
personen	17	8
vaartijd	dagvaart	kontinuvaart

Tabel 2.10. Vergelijking sleepvaart en duvaart

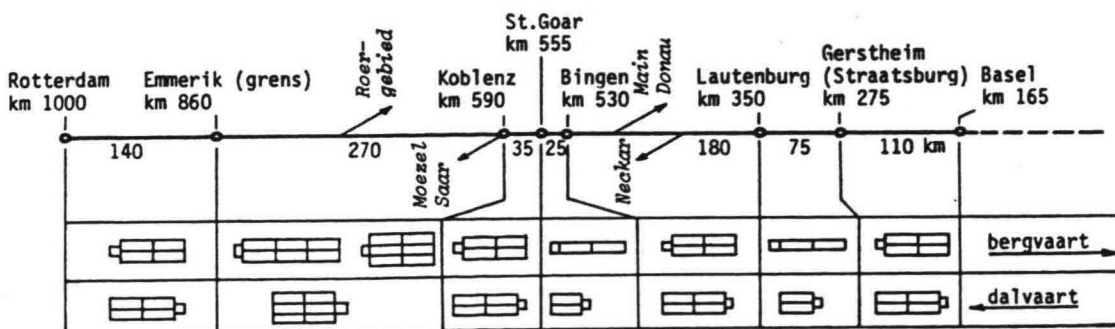
Voor de duvaart in Europa is de Rijn verreweg de belangrijkste vaarweg. Daarom zal in het hiernavolgende de aandacht voornamelijk op deze rivier worden gevestigd.

Duvaart op de Rijn wordt in het algemeen toegepast voor het vervoer van massagoederen. Hierbij is sprake van punt-punt verkeer, waarbij de meeste vracht "naar boven" wordt gebracht. In dalvaart zal in de meeste gevallen met lege bakken worden gevaren.

goederen	stroomopwaarts		stroomafwaarts	
	duvaart	totaal	duvaart	totaal
ertsen	30,8	37,7	0	0,4
vaste brandstoffen (kolen)	0,8	3,2	2,8	6,1
aardolieprodukten	2,5	19,3	0,1	0,9
bouwmaterialen	0,5	3,6	1,6	23,9
overige	2,3	21,9	2,8	16,3
totaal	36,9	85,7	7,3	47,6

Tabel 2.11. Goederenvervoer via Lobith door de binnenvaart in mln ton (1979)

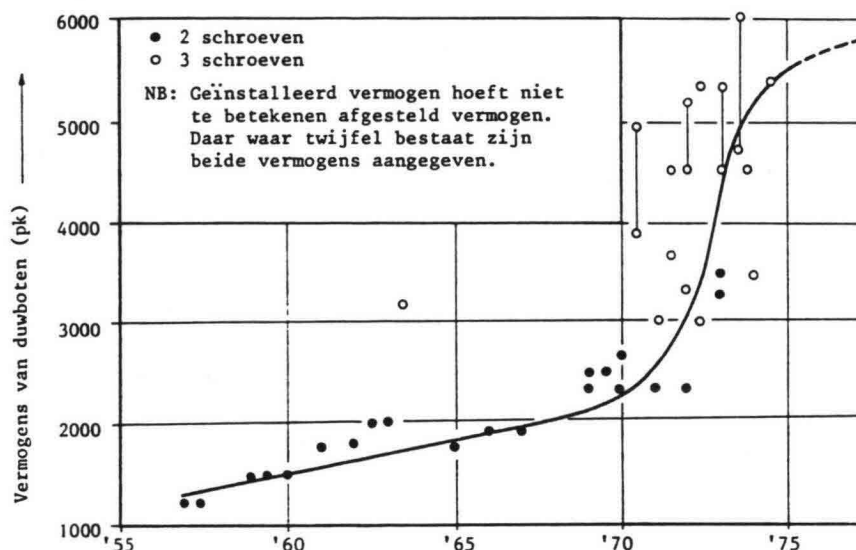
Figuur 2.13 geeft de formaties weer waarmee gevaren mag worden. In zijn algemeenheid geldt een maximaal toegestane lengte van 185 m. Op de Boven-Rijn en op de Waal is onder bepaalde voorwaarden toegestaan om met afmetingen 193 x 22,8 m te varen. Op de Nieuwe Maas houdt men in verband met daar veel voorkomende duwkonvooien van niet-standaardafmetingen een maximum van 200 x 33 m aan.



Figuur 2.13. Maximaal toegestane duwformaties op de Rijn (situatie 1980)

Sinds 1974 wordt door de West-Duitse autoriteiten onder bepaalde voorwaarden voor het traject Duitse Rijn van Koblenz tot de Duits-Nederlandse grens de vaart met zes bakken toegestaan. Deze voorwaarden omvatten ondermeer dat bij de bepaalde hoogste en laagste waterstanden niet met zes bakken gevaren mag worden, dat er een minimale kielspeling van 80 cm moet zijn in plaats van 50 cm bij de huidige vierbaks duwvaart, en dat in de dalvaart tenminste twee en ten hoogste vier bakken beladen moeten zijn. Bovendien geldt op sommige riviervakken een oploop- en ontmoetingsverbod.

Over de ontwikkeling van de **motorvermogens** van de duwboot geeft figuur 2.14 enige informatie. De vergroting van het motorvermogen is in het begin van de duwvaart te verklaren uit de toepassing van grotere bakken, en later ook door het varen met meer bakken. Globaal geldt voor twee-, vier- en zesbaks duwvaart een benodigd motorvermogen van respectievelijk 2400, 4500 en 5400 pk.



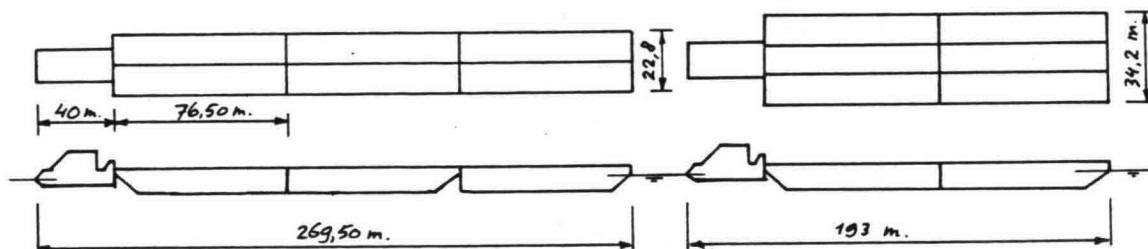
Figuur 2.14. Ontwikkeling van de vermogens van duwbotten op de Rijn

Zesbaks duwvaart

Met de vierbaks duwvaart werd in 1984 van Rotterdam naar de staalfabrieken in het Ruhrgebied ca. 12 mln ton erts vervoerd, dit is ca. 45% van het door de binnenvaart vervoerde tonnage op dit traject. Hiervan bedroegen alleen de transportkosten al ca. f. 6,40 per ton. Teneinde de concurrentiepositie ten opzichte van andere havens (Duinkerken, Wilhelmshaven) te verstevigen dringen met name het havenbedrijf van Rotterdam, alsmede de bedrijven die in het achterland van deze haven gevestigd zijn, aan op schaalvergroting in de duwvaart om deze transportkosten te verlagen. Vergroting van de ladingcapaciteit is bij duwvaart niet meer mogelijk door het toepassen van een grotere diepgang, omdat deze bepaald wordt door de waterstand. Vooral de laatste jaren was volledig afladen al niet meer mogelijk. Verdieping van de vaarwegen stuit op grote bezwaren, omdat daarmee het met veel moeite verkregen evenwicht in het Rijntakkenstelsel qua waterverdeling, zandtransport en waterstanden verstoord zou worden. Dit betekent dat, om toch een vergrote capaciteit te krijgen, de toegestane lengte en breedte van een duwkonvooi groter zouden moeten worden (uiteraard gepaard gaande met de noodzakelijke aanpassingen van de vaarweg). Omdat grote waarde gehecht wordt aan het handhaven van de gestandaardiseerde lengte- en breedtematen van de bakken ligt het voor de hand

om, naar West-Duits voorbeeld, de mogelijkheden van zesbaks duwvaart te onderzoeken.

Er worden twee mogelijke formaties van zesbaks duweenheden onderscheiden, namelijk de lange (3 x 2) en de brede (2 x 3) formatie. In het algemeen geldt dat de lange formatie minder weerstand ondervindt en dus sneller is, terwijl de brede formatie kompakter (d.w.z. stijver en minder windgevoelig), dus beter manoeuvreerbaar is.



Figuur 2.15 Zesbaks duweenheid in lange en in brede formatie

Proefvaarten (zomer 1983) met duwboten van ca. 5400 pk hebben aangetoond dat het traject Rotterdam-Ruhrgebied met de lange formatie in 28 uur kan worden afgelegd, tegen 33 uur met de brede formatie en 24 uur met de vierbaksformatie. De manoeuvreereigenschappen van de lange formatie in bergvaart (dus met geladen bakken) bleken niet veel slechter te zijn dan die van een duweenheid met vier bakken.

In dalvaart met lege bakken is het manoeuvreren met de (windgevoelige) lange formatie lastig, en het ruimtebeslag in met name de bochten onacceptabel groot.

Men heeft onderzoek verricht naar de verbetering hiervan door de toepassing van knikpunten (tussen de duwboot en de achterste bakken en tussen de middelste en de voorste bakken). Hoewel de padbreedte van zo'n knikbestuurde eenheid inderdaad afneemt, vreest men dat de andere vaarweggebruikers door het afwijkende vaargedrag een grotere schrikafstand zullen aanhouden. Bovendien zal zo'n knikbesturingssysteem de transportkosten doen toenemen.

Overigens wordt knikbesturing bij kleine duweenheden in Rusland al zeer veel toegepast, en heeft men in Duitsland al een goed funktionerende bestuurbare schakelkoppeling ontwikkeld, die het mogelijk maakt om een koppelverband bij de koppeling te knikken. Op de smalle en bochtige rivier de Main varen al enkele knikbare koppelverbanden; op de Rijn is het voorlopig nog verboden om geknikt te varen.

De brede formatie is in de (ongeladen) dalvaart vrijwel even goed manoeuvreerbaar als de vierbaksformatie, al is het ruimtebeslag uiteraard wel groter. Hierbij is de toepassing van twee stel koproeren bij de voorste bakken vereist, of tenminste twee geladen duwbakken.

Op grond van het bovenstaande lijkt het aannemelijk dat, indien overgegaan zou worden tot zesbaks duwvaart, in de geladen bergvaart met de lange (snellere) formatie en in de ongeladen dalvaart met de brede (beter manoeuvreerbare, minder windgevoelige) formatie gevaren zal worden. Men hoopt zo ca. 20% op de transportkosten te kunnen besparen.

Bij deze kostenberekening zijn echter een aantal (optimistische) veronderstellingen gedaan. Zo gaat men er van uit dat de motorvermogens van de

duwbotten niet groter worden dan 6000 pk, dat de duwstellen even diep kunnen (of mogen) afladen als bij vierbaks duwvaart het geval was (in relatie tot de waterstand), dat er geen aanvullende nautische uitrusting vereist is, en dat met dezelfde bemanningskosten kan worden gevaren.

Alvorens de Nederlandse overheid definitief haar toestemming zal geven om zesbaks duwkonvoeien op de route Rotterdam-Ruhrgebied in te zetten, zullen de nadelen voor de rivier en de overige scheepvaart nog verder moeten worden bekeken. Een belangrijke vraag is of het huidige maximum vermogen van de duwbotten van ca. 6000 pk (waarvan bij vier bakken slechts 80% wordt gebruikt) in de toekomst nog groter zal worden, om met de zesbaks formatie dezelfde snelheid als met de vierbaks formatie te kunnen halen. Een groter vermogen betekent immers een grotere belasting voor de vaarweg en medevaarweggebruikers. Verder zijn er nog knelpunten op de rivier die moeten worden opgelost, zoals de bruggen bij Dordrecht en enkele te krappe rivierbochten.

Voorts zou een verhoogde veiligheid bereikt kunnen worden door een betere training van de duwbootkapiteins (met behulp van een simulator) en door de verbetering van de verkeersbegeleiding (met behulp van een informatieverstrekkend volgsysteem). Invoering van nieuwe scheepstypen zal namelijk in ieder geval in de beginfase een grotere kans op ongevallen betekenen. Zo heeft in de 60-er jaren het opkomen van het ene en het verdwijnen van het andere scheepstype in nogal wat ongevallen geresulteerd. Er liepen toen immers verschillende vaarpatronen door elkaar: de aflopende sleepvaart, de beginnende motorschepen met onervaren lichterkapiteins, de opkomende duwvaart en het populairder wordende koppelverband.

Een laatste ontwikkeling is het toestaan van proefvaarten met zes bakken gedurende een jaar (gestart in februari 1986). De kondities moeten dan wel gunstig zijn, zoals een windkracht minder dan 6 Beaufort, en een waterstand op de Waal hoger dan NAP + 10 m op de peilschaal bij Lobith. Deze situatie doet zich ongeveer in 40% van de tijd voor.

2.6. Ontwikkelingen

Twee belangrijke categorieën die op de binnenwateren vervoerd worden zijn bulkvervoer en vervoer van gevaarlijke stoffen (brandstoffen, oliën en chemicaliën). Het bulkvervoer is in sterke mate bepalend voor de verkeersdruk. De gevaarlijke stoffen vragen veel aandacht in verband met de gevolgen bij ongevallen. Tabel 2.12 geeft een indruk van het aandeel van de verschillende scheepstypen.

	aantal	laadvermogen (x 1000 ton)
tankschepen	457	545
overige schepen	6004	4683
totaal	6461	5228 (hiervan 9% sleepschepen, 73% motorschepen en 18% duwbakken)

Tabel 2.12. Samenstelling van de actief aan het vervoer deelnemende Nederlandse binnenvloot naar scheepstype (1 januari 1983)

Blijkens tabel 2.13 is in Nederland het totaal aantal schepen de laatste decennia sterk afgenomen. Het gezamenlijk laadvermogen in tonnen is daarentegen toegenomen, hetgeen betekent dat het laadvermogen per schip aanzienlijk is vergroot (het gemiddeld laadvermogen bedroeg in 1983 meer dan 800 ton). Naar scheepsgrootte bezien blijkt dat hoe kleiner de schepen, hoe groter de teruggang. De laatste jaren is alleen nog bij schepen met een laadvermogen groter dan 1000 ton een groei vast te stellen. Deze **schaalvergroting** komt overigens voor een groot gedeelte op rekening van de duwvaart.

Na 1960 heeft er een grootscheepse inkrimping van het Nederlandse vaarwennet plaatsgevonden. Bijna 2500 km (vooral kleinere regionale vaarwegen) is sindsdien gesloten voor de scheepvaart; het vaarwennet heeft nu een totale lengte van 4960 km (vergelijk het spoorwennet met 3000 km en het wegnnet met ruim 90.000 km). Evenals de spoorwegen is de binnenvaart verdrongen uit het regionaal vervoer en concentreert zich nu op een rompnnet van hoofdverbindingen.

laadvermogen (ton)	aantal schepen (laadvermogen .1000 ton)		
	1959	1970	1983
21 - 249	8580 (1236)	5604 (1250)	512 (87)
250 - 399			1228 (409)
400 - 649		2019 (1044)	1670 (976)
650 - 999	1410 (912)	1203 (1001)	1456 (1193)
1000 - 1499		658 (844)	884 (1075)
1500 - 2999		400 (810)	653 (1384)
> 3000			58 (204)
totaal	9990 (2148)	9884 (4949)	6461 (5228)

Tabel 2.13. Samenstelling van de actief aan het vervoer deelnemende Nederlandse binnenvloot naar scheepsgrootte (per 1 januari)

De keuze van het type vaartuig dat bij het vervoer zal worden ingezet is ondermeer afhankelijk van de grootte van het ladingaanbod, de regelmaat waarmee lading wordt aangeboden, de aard van de lading en het traject.

Het massagoederen- of bulkgoederenvervoer (met name het punt-punt verkeer) wordt voor het grootste deel al met **duwvaart** gedaan. Het aandeel van de duwvaart in het goederenvervoer op de Rijn bedroeg in 1970 nog slechts 19%, hetgeen in 1984 al was opgelopen tot 33% (123 mln ton gemeten bij Lobith; bij deze tellingen wordt ook het koppelverband als duwvaart beschouwd). Deze ontwikkeling werd in de hand gewerkt door het gereedkomen van enkele duwvaartkanalen, bijvoorbeeld het Amsterdam-Rijnkanaal en het Rijn-Scheldekanaal. Voorts zal dit aandeel mogelijk nog toe kunnen nemen door de eventuele invoering van de zesbaks duwvaart. Verder zijn er al speciale duwbakken voor containervervoer in gebruik. Ook wordt er, in navolging van de duwvaart op de Donau, gekeken naar de mogelijkheid van RoRo-transport met behulp van bakken met een breedte van 22,8 m en met twee dekken. Dit laatste lijkt wegens de grote concurrentie van het weg en railverkeer nog geen levensvatbaarheid te hebben.

Het aandeel van de **binnensleepvaart** zal steeds verder dalen. In 1964 werd op de Rijn nog ruim 30% van de goederen met sleepschepen vervoerd; momenteel is dit al minder dan 5%. Verwacht mag worden dat deze ontwikkeling zich doorzet en dat de sleepvaart vrijwel in zijn geheel door de duwvaart zal worden verdrongen. Dit neemt niet weg dat er altijd enkele sleepboten nodig zullen blijven voor speciale transporten, het breken van ijs en dergelijke. Ook lijkt het aantal sleeplichters in Nederland zich te stabiliseren rond de 500 stuks, omdat deze veel goedkoper in overligdagen te houden zijn dan motorschepen.

De **motorvrachtvaart** neemt een tussenpositie in. Onder andere door de vergroting van de bestaande kanalen zullen de kleine schepen, zoals de Spits en de Kempenaar, steeds meer verdwijnen en plaats maken voor grotere motorschepen en duwvaartkonvoeien. Het is te verwachten dat het containerschip een grotere rol zal gaan spelen, al zal de snellere spoorweg of het containervervoer langs de weg een grote konkurrent blijven (afhankelijk van de ontwikkeling van de brandstofkosten e.d.). Bij nieuwbouw wordt dan ook steeds vaker rekening gehouden met de mogelijkheid om containers te vervoeren.

Enerzijds maakt een schip dat vele soorten lading kan vervoeren een flexibele bedrijfsvoering mogelijk, dat wil zeggen de schipper kan zich snel aanpassen aan veranderingen in de markt. Anderzijds leidt specialisatie tot een scherpere prijsstelling, dus tot een betere konkurrentiepositie ten opzichte van andere vervoersmiddelen.

Verder maakt men de nieuwe schepen in veel gevallen geschikt om met één of meer bakken of met een ander motorschip een koppelverband te vormen. Een koppelverband verbruikt ca. 40% minder brandstof dan twee afzonderlijk varende schepen. Bovendien kan de reisduur worden verkort (ten opzichte van een enkel schip met hetzelfde totale laadvermogen) door tegelijkertijd op verschillende plaatsen te laden of te lossen. Indien een knikkoppeling wordt toegepast kan het koppelverband even bochtige en smalle vaarwegen bevaren als een enkel schip.

Een probleem is dat de Nederlandse binnenvloot een te groot aanbod van ladingruimte heeft. De vervoerscapaciteit is vrijwel op laagwaterperiode afgestemd. Het tonnage-overschot onder gemiddelde omstandigheden werd in 1984 geschat op ca. 1,5 mln ton = 25%. Naast de benodigde reservecapaciteit is hierin een structurele overcapaciteit begrepen van minstens 0,5 mln ton. De nadelige effecten worden vrijwel geheel afgewenteld op de partikuliere schippers; hun rentabiliteitspositie is dan ook al jarenlang bijzonder slecht.

Dit neemt niet weg dat de positie van de binnenvaart als konkurrent van het weg- en railvervoer redelijk is. Dit hangt ondermeer samen met

- het minder belangrijk zijn van de vervoerssnelheid. Door de gecomputeriseerde voorraadbeheersing in het bedrijfsleven is de aanvoer van grondstoffen langer vooruit te plannen.
- de stijgende loon- en brandstofkosten. De globale vervoersprijs per tonkm bedroeg in 1984 voor het wegvervoer 33 à 46 cent, voor het railvervoer ca. 15 cent en voor de binnenvaart slechts 7 à 8 cent.

Verder steekt de binnenvaart vooral gunstig af bij het vrachtverkeer over de weg wanneer men aspecten als verkeersveiligheid, luchtvervuiling, geluidhinder en ruimtebeslag in beschouwing neemt. Zo vervangt een 2-baks duweenheid van 4400 ton 110 treinwagons van 40 ton of 220 vrachtwagens van 20 ton. Een nadeel blijft het vaak extra benodigde voor- en natransport.

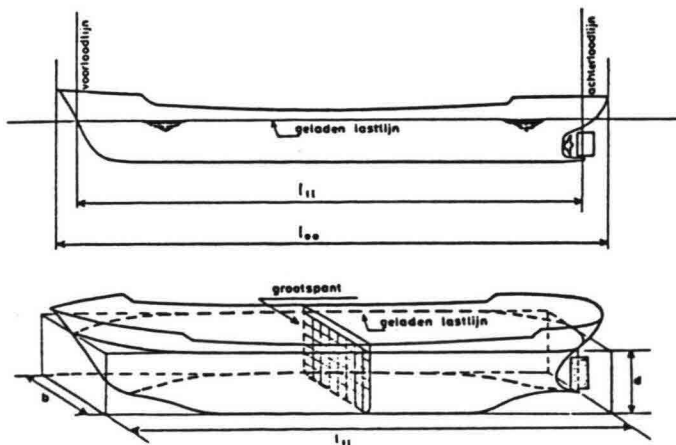
2.7. Scheepskarakteristieken

2.7.1. Enige begrippen

Alvorens de verschillende scheepskarakteristieken te behandelen volgt hier eerst een kort overzicht van veel gehanteerde begrippen met betrekking tot de hoofdafmetingen, de grootte en de vorm van schepen (in rusttoestand).

Begrippen met betrekking tot de **hoofdafmetingen** van het schip:

- Carène = de vorm van het ondergedompelde deel van het schip als meetkundige figuur.
- Displacement = volume van het verplaatste water, dus de inhoud van de carène.
- Grootspant = dwarsdoorsnede over de scheepsromp met de grootste oppervlakte (A_S = oppervlak van het ondergedompelde deel van het grootspant).
- Lastlijn of waterlijn = snijlijn tussen het vlak van de waterspiegel en de romp (bovenbegrenzing van de carène). Geladen lastlijn is lastlijn bij geladen schip.
- Vrijboord = verticale afstand tussen de bovenkant van het dek en de waterlijn.
- Lengte tussen de loodlijnen (l_{11}) = afstand tussen voor- en achterloodlijn. De voor- respectievelijk de achterloodlijn gaat door het snijpunt van de geladen lastlijn met de voorzijde van de voorsteven respectievelijk met de achterkant van de roersteven (of in het geval van een balansroer met de roerkoning).
- Lengte over alles (l_{0a}) = afstand tussen het voorste punt van de voorsteven en het achterste punt van het hek.
- Scheepsbreedte (b) = maximum breedte van het schip.
- Diepgang (d) = hoogte van de waterlijn tot de onderkant van de kiel.
- Holte (h) = verticale afstand tussen de onderkant van het vrijboorddek en de bovenkant van de kiel.



Figuur 2.16. Hoofdafmetingen van een schip

Begrippen met betrekking tot de **grootte** van het schip:

- Laadvermogen = het gewicht van de lading alleen (in tonnen van 1000 kg).
- Waterverplaatsing = het gewicht van de door het schip verplaatste watermassa (in tonnen van 1000 kg); in feite dus het displacement maal het soortelijk gewicht van het water.

Begrippen met betrekking tot de **vorm** van het onderwaterschip:

- Grootspantcoëfficiënt (β): $\beta = A_s / (b \cdot d)$
- Blokcoëfficiënt (δ) : $\delta = \text{deplacement} / (l_{11} \cdot b \cdot d)$

2.7.2. Vormgeving

De vormgeving van met name het voorschip is van grote invloed op de weerstand die het schip tijdens het varen ondervindt. Een scherp, slank schip zal minder weerstand ondervinden dan een vierkante bak. Anderzijds heeft een vierkante bak een groter laadvermogen. Afhankelijk van de te bevaren vaarweg zal daarom een compromis gevonden moeten worden tussen **laadvermogen en vaarsnelheid**.

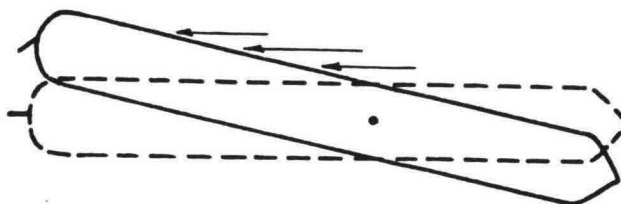
Het meest vierkante of volle schip dat momenteel nog gebouwd wordt is de "Spits". Dit vaartuig is vooral geschikt voor het gebruik op de Noord-Franse kanalen en rivieren. Aangezien de sluisen de afmetingen bepalen en er zoveel mogelijk lading meegenomen moet worden, is dit schip haast vierkant, en van een lichte (zwakke) konstruktie. De snelheid van een Spits is klein, en door de enorme weerstand bijna onafhankelijk van het motorvermogen. Een ander uiterste is het "Donau sleepschip". Omdat dit schip op een sterk stromende rivier moest varen, heeft men hier laadvermogen prijs gegeven voor een verminderde weerstand. Het resultaat is een zeer scherp, slank schip.

De volheid van een schip wordt ondermeer weergegeven met behulp van de blokcoëfficiënt (δ). In tabel 2.14 is deze voor de voornaamste scheepstypen gegeven. Bij langere schepen kan de waarde van de blokcoëfficiënt dichter bij 1 (behorende bij een rechthoekige bak) liggen; de invloed van het voor- en achterschip wordt immers relatief kleiner.

type schip	blokcoëfficiënt δ
motortankschip	0,85 à 0,92
motorschip voor droge lading	0,8 à 0,9
motor-schroefsleepboot	0,7 à 0,8
havensleepboot	0,45 à 0,5
boegseerboot	0,5 à 0,6

Tabel 2.14. Blokcoëfficiënten

Voor zelfvaarders geldt meestal een lengte/breedteverhouding van 6 à 8. Dit heeft te maken met de **koersstabiliteit** van het schip. Voor een koersverandering moet de weerstand die het vaartuig bij het draaien ondervindt worden overwonnen. Indien het vaartuig snelheid ten opzichte van het water heeft, wordt de koersstabiliteit bestendig door de traagheid van het schip (massa x snelheid), en door het drukverschil in de zijden van het schip.



Figuur 2.17. Koersstabiliteit

Wanneer de romplengte groot is ten opzichte van de breedte (dus een grote slankheid), blijft het vaartuig min of meer uit zichzelf op koers. De **draaikapaciteit** (dus ook de manoeuvreerbaarheid) van een schip wordt daarentegen bevorderd door een kleine slankheid.

Naast de lengte/breedteverhouding is ook het verloop van de waterlijnen en de kimgangen van grote invloed op de koersstabiliteit van een schip. Een vierkante kim betekent dat het schip moeilijk van koers is te krijgen. Bij duwbotten daarentegen, waar bijna alles onderschikt is gemaakt aan de eis dat de schroeven een goede watertoevoer moeten hebben, is voor een sterk geveegd achterschip gekozen. Als gevolg hiervan zijn deze boten, wanneer zij geen bakken voor de kop hebben, bijzonder lastig op koers te houden.

2.7.3. Voortstuwingsysteem

Voor schepen die met een **gewone schroef** (3, 4, 5 of 6-bladig) worden aangedreven worden meestal **dieselmotoren met hoge toerentallen** toegepast (duwbotten: 260 à 280 toeren per minuut). De machines zijn kleiner ("dus" goedkoper) maar maken echter meer herrie. Bovendien kunnen de schroeven een kleinere diameter hebben dan bij toepassing van "langzaamlopers". Gesteld wordt dat bij hoge toerentallen een schroefbelasting van 350 à 400 pk per m² oppervlak van de schroefcirkel aan de hoge kant is. Dergelijke hoge belastingen vinden we dan ook alleen bij duwbotten, waar wegens diepgangseisen geen grotere schroefdiameter kan worden toegepast, terwijl een uitvoering met vier in plaats van drie schroeven een bredere duwboot zou betekenen. Ook bij motorvrachtschepen met grote vermogens worden wel **meerdere schroeven** toegepast.

De schroeven worden vaak uitgerust met **straalbuizen**. Deze vergroten het rendement van de schroef (bij gelijkblijvend vermogen kan een kleinere schroefdiameter worden toegepast) en, vooral indien draaibaar, de manoeuvreerbaarheid door de gunstige aanstroming van het roer.

Naast deze gewone schroeven worden ook wel toegepast:

- Schroeven met verstelbare spoed van de bladen (voornamelijk nog bij zeeslepers).
- Draaibare schroeven, waarbij het voortstuwingsysteem en het besturings-systeem in feite gekombineerd zijn. Bijvoorbeeld Schottel Propellers, of Voith Schneider Propellers. De nadelen van deze systemen zijn dat in bochten vrij veel vaartafval optreedt (de resultante in de vaarrichting neemt snel af) en dat de installatie kostbaar en kwetsbaar is.
- Waterpompvoortstuwing (alleen bij kleine schepen).

Voor de **benodigde vermogens** zijn enkele richtgetallen uit de gegevens van bestaande schepen gedestilleerd. Zo geldt voor zelfvaarders een verhouding laadvermogen (ton) : motorvermogen (pk) = 1,3 à 2, waarbij de motorvrachtschepen voor droge lading dicht bij de 1,3 en de motortankschepen dicht bij de 2 zitten. Voor de grotere schepen kan deze verhouding een stuk gunstiger worden indien met een bak een koppelverband wordt gevormd. Bij duwbotten ligt deze verhouding iets onder de 2; dit wordt veroorzaakt door het feit dat veel rederijen met het oog op de toekomst "te sterke" duwbotten hebben laten bouwen.

Voor het brandstofgebruik (gasolie: in 1985 ca. 90 ct/ltr excl. BTW voor grensoverschrijdend vervoer) geldt bij benadering 0,19 ltr per pk.uur. De brandstofkosten betreffen ca. 30 à 40% van de totale jaarlijkse exploitatiekosten.

2.7.4. Roersysteem

Veruit de meeste binnenschepen zijn voor de besturing uitgerust met een roer, dat aangestroomd wordt door een schroefstraal. In de binnenvaart spelen wendbaarheid van het schip en goede stuureigenschappen een grote rol, met name bij het achteroplopen en het ontmoeten van schepen, alsmede bij het varen op ondiep water. Er is daarom een groot aantal roersystemen ontstaan, die allen een optimale stuurwerking beogen.

Door de geringe diepgang en het vereiste roerooppervlak wordt de benodigde roerlengte groot en is soms niet meer in één roervlak onder te brengen. Ter oriëntatie: het roerooppervlak wordt gewoonlijk uitgedrukt als

$A_r = c_r \cdot l \cdot d$, met

A_r = roerooppervlak (m^2)

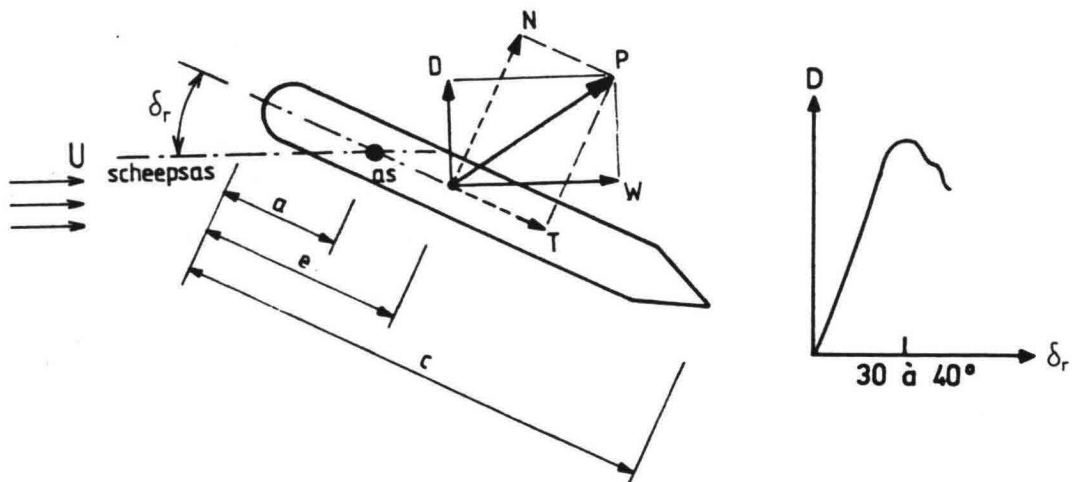
c_r = faktor afhankelijk van roersysteem en scheepstype (0,03 à 0,07)

l = scheepslengte (m)

d = diepgang (m).

De **werking** van het roer (of de roeren) kan op zeer gesimplificeerde wijze als volgt worden uitgelegd (zie figuur 2.18):

De drukkracht (P) die ontstaat door het verdraaien van het roer over een hoek δ_r , en aangrijpt in het drukpunt op een afstand e vanaf de voorkant van het roer, kan worden ontbonden in een roerweerstand (W) evenwijdig aan de scheepsas, en een dwarskracht (D) loodrecht daarop. Deze laatste component moet het achterschip omdrukken, terwijl de eerste een vermindering van de voortstuwingskracht betekent. De grootte van deze krachten is afhankelijk van het roertype en de aanstromingssnelheid van het water (dus van de voortstuwingskracht). Hoe meer er van de voortstuwingskracht in dwarskracht wordt omgezet, des te beter wordt het rendement van het roer (= de verhouding dwarskracht/stuwkracht).



Figuur 2.18. Principe werking roer en liftkromme

Bij een kleine hoek δ_r geldt voor de plaats van het drukpunt: $e = 0,25 \cdot c$. De liftkromme, die het verband geeft tussen de hoek δ_r en de dwarskracht D , bereikt het maximum voordat het profiel "overtrokken" wordt. De stroming ligt dan niet meer aan op de zuigzijde en het aangrijpingspunt van de resultante van de krachten verschuift naar achter, bv. $e = 0,4 \cdot c$. Bij het achteruitvaren verschuift het drukpunt naar de voorkant van het roer: $e = 0$.

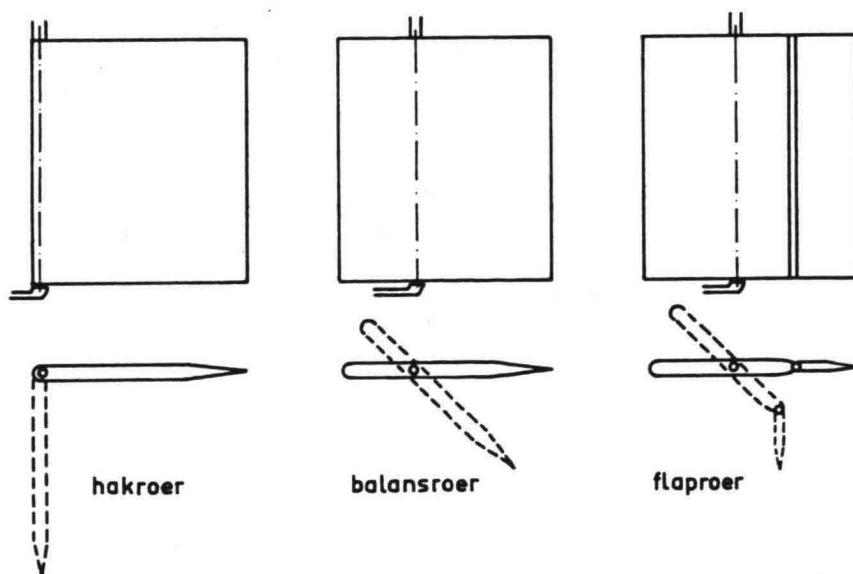
Het roertype dat men kiest is, naast de konstruktie van het achterschip, ook afhankelijk van de gewenste vaarsnelheid van het schip en het vermogen op de schroef. In het kort zullen enkele voorbeelden van roersystemen worden behandeld, waarbij een onderscheid wordt gemaakt tussen het enkelvoudige roer en meer-roerensystemen.

Het enkelvoudige roer

- Het (traditionele) **hakroer of plaatroer**, waarbij de roerkoning de voorkant van het roer vormt. Dit roer heeft een relatief groot oppervlak en kan ca. 90° ten opzichte van de scheepsas gedraaid worden. Het is geschikt om nog bij lage snelheden een roerkracht op te roepen.

- Het **balansroer**, met de roerkoning in de buurt van het drukpunt, dat wil zeggen op $a \approx 0,25.c$. Hierdoor wordt het roerkoningskoppel ($= N.(e - a)$) vrij klein gehouden. Dit modernere roer heeft in de regel een maximale uitslag van 45° en een grootste dwarskrachtontwikkeling bij een roerhoek van 30 à 40° . De stroomsnelheid langs het roer moet hier groter zijn dan bij het hakroer.

- Het **flaproer of stabilo-roer**. Hierbij is achter het hoofd-roer een flap (stabilo) bevestigd, die twee maal zo snel draait als het hoofd-roer. Bij een uitslag van 45° staat de flap 90° ten opzichte van hart-schip (dus dwarsscheeps). Door deze uitvoering is het mogelijk om per schroef met één roer te volstaan, en vervallen de (vooral bij de vaart op kanalen) zeer kwetsbare zijroeren. Om de manoeuvreerbaarheid nog verder te verbeteren wordt het flaproer ook wel gekombineerd met bestuurbare Kort-straalbuizen. Een nadeel is dat een kleine wijziging al een grote roeruitslag geeft; dit maakt dit roertype minder geschikt voor automatische besturing. Verder betekenen bewegende delen meer onderhoud en een grotere kans op averij.

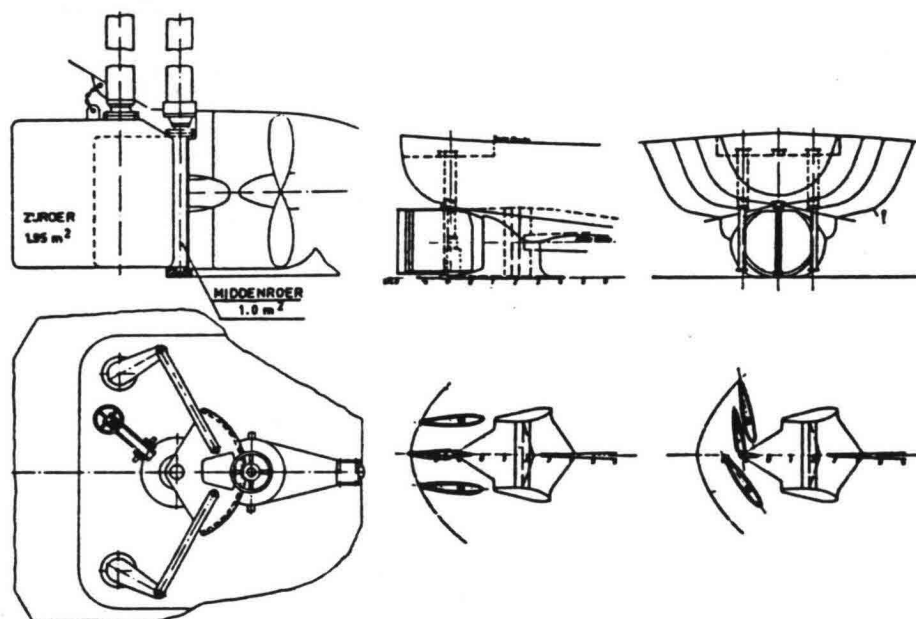


Figuur 2.19. Voornaamste roertypen

Meer-roerensysteem

Om een betere besturing te krijgen met minder grote roerkrachten op de koning en het stuurmechanisme worden meerdere (balans)roeren naast elkaar opgesteld. De meeste van dit soort roersystemen lenen zich voor toepassing achter schroeven in Kort-straalbuizen en in tunnels. Er kunnen twee hoofdsystemen worden onderscheiden:

- Met **onderling dezelfde uitslag**. Bijvoorbeeld het Hitzler-roersysteem. Hierbij zijn de twee buitenste roeren groter van oppervlak dan het middelste. De maximale roeruitslag is 50° .
- Met **onderling verschillende uitslag** van de roeren door de toepassing van differentieel kwadranten. Een voorbeeld hiervan is het Schilling-roersysteem.



Figuur 2.20. Roeropstellingen volgens systeem Hitzler (links) en volgens systeem Schillings (rechts)

2.7.5. Kopbesturing

Bij de modernere (lange en snelle) binnenschepen kan men in de meeste gevallen niet meer volstaan met een hoofdroersysteem om de in geladen toestand benodigde draaiimpulsen te geven. Ongeladen binnenschepen zijn in het algemeen goed bestuurbaar, daar de schroef- en roerkrachten relatief groot zijn ten opzichte van de waterverplaatsing, maar kunnen door hun grote oppervlak boven de waterlijn door zijwind in de problemen komen. Vooral lange schepen, zoals duwstellen en koppelverbanden, moeten onder die omstandigheden met zeer grote drift-hoeken varen. Het ballasten van de voorste bakken kan hiervoor soms een oplossing zijn, maar is tevens nogal lastig.

Vanaf een bepaalde (gezamenlijke) scheepslengte blijkt een kopbesturings-systeem derhalve noodzakelijk om de gewenste verkeersveiligheid op de druk bevaren binnenwateren te kunnen blijven garanderen. De invloed van kopbesturing op de manoeuvreerbaarheid is namelijk vrij groot, omdat hiermee al met een kleine stuwkracht een aanzienlijk moment om het zwaartepunt van het schip kan worden uitgeoefend.

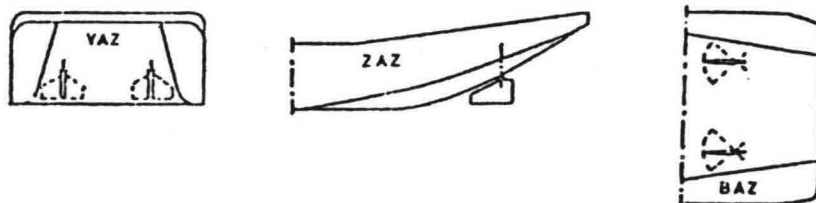
De eisen die aan een dergelijk systeem gesteld moeten worden gaan voor een groot binnenschip aanzienlijk verder dan voor een zeeschip. Met name indien het motorschip met twee à drie bakken een koppilverband vormt, is een kopbesturingssysteem onontbeerlijk. Te denken valt ondermeer aan de volgende situaties:

- a. Het exakt aan kunnen varen van een sluisopening bij zeer lage snelheid.
- b. Het aankoppelen van bakken op stroom om een koppilverband te formeren.
- c. Het koershouden van het lege schip bij zijwind.
- d. Ondersteuning van het hoofdvoortstuwingsysteem.
- e. Verkorten van de stopweglengte bij volle dalvaartsnelheid.

Er kunnen twee soorten kopbesturing worden onderscheiden, namelijk passieve en actieve kopbesturing. Eventueel kunnen beide gekombineerd worden toegepast.

Passieve kopbesturing

Om te voorkomen dat een schip bij veel wind "afvalt" (situatie c) wordt steeds vaker overgegaan tot de toepassing van één of twee koproeren. Ook bij duweenheden, waarbij de behoefte aan kopbesturing vooral bij hogere vaarsnelheden geldt (verkleining van de padbreedte bij ongeladen dalvaart), maakt men hier al gebruik van op één der voorste bakken. De bediening van de koproeren kan hierbij vanuit de stuurhut geschieden.



Figuur 2.21. Duwbak met twee koproeren

De dwarskracht die met een koproer kan worden uitgeoefend is recht evenredig met het kwadraat van de aanstroomsnelheid van het water, zodat koproeren alleen bij hogere snelheden effectief zijn. Voor de overige situaties (a, b, d en e) heeft een koproer nauwelijks effect. Hierdoor valt de toepassing van passieve kopbesturing als enige manoeuvreerhulpmiddel voor grote binnenschepen praktisch af.

Opm.: De in Duitsland al bij koppilverbanden toegepaste bestuurbare schakelkoppeling kan ook als passief besturingssysteem worden beschouwd. Door de kleinere benodigde padbreedte (het verband kan ter plaatse van de koppeling worden geknikt) kan op smallere en bochtigere vaarwegen worden gevaren.

Aktieve kopbesturing

Bij dit systeem wordt in het voorschip eveneens een voortstuwertoegepast. De volgende vier typen boegschroefinstallaties worden hier onderscheiden:

- A. Ingebouwde dwarsstraalinstallatie met horizontaal opgestelde propeller.

Uitstroming door dwarsscheeps ingebouwde tunnel. Aanstroming nagenoeg horizontaal vanaf de voorkant van het schip (bv. Ebert, BSG) of vanaf de zijkant van het schip (Bv. Schottel-dwarsstraalinstallatie).

B. Ingebouwde boegschroef met de uitstroming op het vlak van het schip door een over 360° draaibaar rooster, waardoor met behulp van de schuin geplaatste roosterschoepen een kracht in elke gewenste richting kan worden uitgeoefend. De propeller is meestal horizontaal opgesteld. Aanstroming vanaf het vlak (= scheepsbodem) of vanaf de schuin oplopende voorkant van het schip. Bv. Elka-jet, Frans van Tiem.

C. Ingebouwde boegschroef met vertikaal opgestelde propeller. Aanstroming vanaf het vlak van het schip. Uitstroming door dwarsscheeps ingebouwde tunnel; soms ook naar voren en/of naar achteren. Bv. Schottel-jet.

D. Vrij onder het vlak uitstekende (soms intrekbare) over 360° draaibare boegschroef met horizontale propelleras. Bv. Schottel-roerpropeller.

Alle boegschroeven hebben bij toenemende vaarsnelheid een lagere effectiviteit omdat de ontbondene van de stuwdruk loodrecht op het schip snel kleiner wordt. Bij een horizontale aanstroming vanaf de voorkant van het schip zal de stuwkrachtontwikkeling bij hogere vaarsnelheden echter beter zijn dan bij een aanstroming vanaf de zijkant of vanaf het vlak: ook zonder propeller, dus alleen door ombuiging van de kinetische energie, neemt de stuwkracht toe met de instroomsnelheid. Het is dan echter nog de vraag of de dwarskracht (dit is de resultante loodrecht op de scheepsas) eveneens toeneemt. Bovendien betekent een toename van de dwarskracht niet noodzakelijk dat de daadwerkelijke werking met betrekking tot het koershouden of koersveranderen van het schip toeneemt. Immers, de koersstabiliteit van het schip neemt ook toe met de vaarsnelheid. Voorts is de vorm van het voorschip van zeer grote invloed op het gedrag van het schip tijdens de vaart.

Aanstroming vanaf de voorkant van het schip betekent ook een grotere kwetsbaarheid voor drijvend vuil dan bij een aanstroming vanaf het vlak. Een vrij uitstekende boegschroef is uiteraard nog kwetsbaarder, dus minder bedrijfszeker, en vereist bovendien een grotere waterdiepte onder het schip.

Een vertikaal opgestelde propeller geeft in principe het voordeel van een mogelijk grotere propellerdiameter, en daarom een hoog rendement bij paaltrekomstandigheden. Dit maakt dit type bijzonder geschikt voor het manoeuvreren bij lage vaarsnelheid. Bovendien is een kleinere diepgang bij de boeg nodig voor een goede aanstroming.

De stuwkracht is evenredig met het debiet maal de uitstroomsnelheid, hetgeen voor een kleine uitstroomdiameter pleit. Dit gaat echter weer ten koste van het rendement bij stilliggend schip.

Het voordeel van het naar alle kanten kunnen leveren van stuwkracht spreekt verder voor zich.

De verschillende typen boegschroeven zijn dus niet allemaal voor dezelfde situatie even geschikt. In zijn algemeenheid kan men wel zeggen dat bij lagere snelheden, zeker beneden 5 à 7 km/h, boegschroeven veel effectiever zijn dan koproeren.

In de praktijk kan de door de boegschroef geleverde dwarskracht alleen bij stilliggend schip worden gemeten. Om te weten welke eis aan deze (bij oplevering te controleren) kracht moet worden gesteld, moet bekend zijn hoe de dwarskracht als functie van de vaarsnelheid verloopt. Dit is immers voor de verschillende typen boegschroeven duidelijk anders.

Ter bepaling van de benodigde dwarskracht bij stilliggend schip (F_{ds}) geeft Heuser [83] voor de typen A, B en C de volgende benadering:

$$F_{ds} = k_m \cdot l_{wl}^3 \cdot d + k_w \cdot A_{sb} \quad (N)$$

Hierin heeft de eerste term te maken met de manoeuvreerbaarheid. Deze blijkt in het bijzonder afhankelijk te zijn van de lengte op de waterlijn (l_{wl}), en in mindere mate van de diepgang (d) en het type boegschroef. Indien bij een snelheid van 10 km/h ten opzichte van het water en 5° koersafwijking een giersnelheid van $10^\circ/\text{min}$ wordt geëist, geldt:

$$\begin{aligned} k_m &= 4,1 \cdot 10^{-3} && \text{voor type A} \\ k_m &= 7,8 \cdot 10^{-3} && \text{voor type B} \\ k_m &= 4,5 \cdot 10^{-3} && \text{voor type C.} \end{aligned}$$

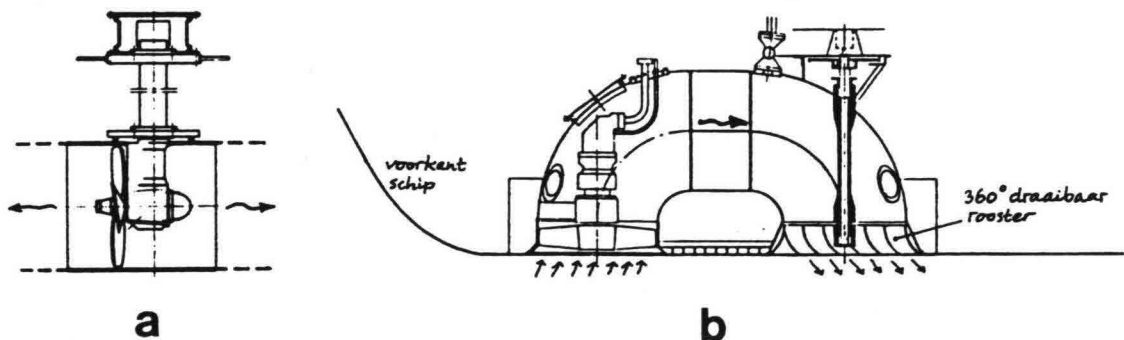
De tweede term is een toeslag in verband met zijwind, en is uiteraard afhankelijk van het getroffen oppervlak boven de waterlijn (A_{sb}) en de windsnelheid:

$$\begin{aligned} k_w &= 6,4 && \text{voor windkracht 3 Beaufort} \\ k_w &= 12,2 && \text{voor windkracht 4 Beaufort} \\ k_w &= 20,8 && \text{voor windkracht 5 Beaufort.} \end{aligned}$$

Voorbeeld: Voor een motorschip met $A_{sb} = 240 \text{ m}^2$ en $l_{wl} = 108 \text{ m}$ bij $d = 3,5 \text{ m}$ geldt bij windkracht 4 en bij boegschroeftype A dat $F_{ds} = 18 + 3 = 21 \text{ kN}$.

In figuur 2.22 worden twee verschillende typen boegschroeven getoond, namelijk

- De Schottel dwarsstraalinstallatie (type A). Deze levert in stilstaand water ca. 100 N stuwkracht per pk geïnstalleerd vermogen.
- De Elka-jet 100 (type B). Deze levert in stilstaand water ca. 60 N stuwkracht per pk geïnstalleerd vermogen, en is leverbaar voor motoren van 150 à 280 pk (voor schepen tot ca. 2000 ton).



Figuur 2.22. Boegschroeven

2.7.6. Vaarsnelheid

Voor een indicatie van de vaarsnelheden van de verschillende vaartuigen kan tabel 2.15 dienen. Hierbij moet wel bedacht worden dat deze waarden voor ruim water gelden.

In kanalen zullen de snelheden lager liggen dan op ruim water, terwijl hier bovendien de vraag belangrijker is welke snelheid de vaarwegbeheerder toelaat. Voor de maximum snelheid van schepen gaat men wel uit van 90% van de grenssnelheid volgens Schijf (zie paragraaf 2.3.1). Hoewel de snelheden enigszins verschillen per profielvorm van de vaarweg (trapezium-, gebro-

ken-, bakprofiel) en er enige vaartafval (= vaarsnelheidsverlies) is in de bocht, kan globaal van de in tabel 2.16 vermelde snelheden voor geladen motorvrachtschepen op kanalen worden uitgegaan.

type schip	laadver- mogen (ton)	vaarsnelheid	
		geladen (km/h)	ongeladen (km/h)
motorschip	< 750	12 à 14	15 à 16
motorschip	> 750	14 à 15	16 à 17
duwstel (2 baks) of koppelverband	> 3000	ca. 12	ca. 12,5
duwstel met 3 of meer bakken	> 5600	ca. 11,5	ca. 13,5

Tabel 2.15. Vaarsnelheden ten opzichte van het water (gemeten op de Waal, periode 1974 - 1975)

klasse	krap profiel	normaal profiel
I	6,5	8,6
II	7,2	9,0
III	7,6	9,4
IV	7,6	9,7

NB: Zie paragraaf 4.2 voor de betekenis van "krap" en "normaal" profiel.

Tabel 2.16. Maximale vaarsnelheden voor geladen schepen op kanalen (km/h)

2.7.7. Stopweglengte

In stilstaand water zijn er proeven verricht naar de invloed van de aanvangssnelheid van verschillende typen geladen motorschepen en het dwarsprofiel van de vaarweg op de stopweglengte. Voor lege schepen zijn hier geen proeven voor uitgevoerd, omdat deze toch een kleinere stopweglengte hebben dan geladen schepen. Wel is er onderscheid gemaakt tussen een **noodstop** (volaan achteruitslaan) en een **gecontroleerde stop**. Uiteraard is voor een gecontroleerde stop een grotere lengte nodig dan voor een noodstop. Gebleken is dat de stopweglengte uitgedrukt kan worden als een aantal malen de scheeps lengte (l).

De waarnemingen geven de indicatie dat het goed mogelijk is bij aanvangssnelheden van 7 à 9 km/h een gecontroleerde stop uit te voeren binnen een lengte van 4 x l. Om deze reden wordt wel gesteld dat het **uitzicht** vanuit de stuurhut (achterop het schip) bij bochten, zijhavens, zwaaikommen en dergelijke minimaal 5 x de scheeps lengte moet bedragen.

aanvangssnelheid (km/h)	stopweglengte
7,2	ca. 1,0 x l
9,0	ca. 1,8 à 2,0 x l

Tabel 2.17. Stopweglengte van een geladen spits (250 pk) en van een geladen kempenaar (300 pk) bij een noodstop op het IJsselmeer

klasse	aanvangssnelheid (km/h)	stopweglengte	opmerking
II	8,6	ca. 2,0 x 1	noodstop
IV	11,5	ca. 2,5 x 1	noodstop
IV	11,5	ca. 4,0 x 1	gekontrol.

Tabel 2.18. Stopweglengte van een geladen kempenaar (300 pk) in
scheepvaartkanalen van verschillende klasse

Hoewel de stopweglengte bij het gebruik van draaibare boegschroeven gereduceerd kan worden, is het toch verstandig om niet op een boegschroef te rekenen. De praktijk heeft uitgewezen dat deze nogal eens weigeren (door plastic, nylondraad, wrakhout of iets dergelijks). Indien een flaproer is toegepast, is het mogelijk om het schip zeer snel te vertragen door het roer een paar maal van boord naar boord te laten lopen. Verder kan in het uiterste geval gebruik worden gemaakt van de ankers.

3. WISSELWERKING TUSSEN SCHIP EN VAARWEG

3.1. Inleiding

Bij het varen van een schip op een vaarweg worden, in de direkte omgeving van het schip, een aantal hydraulische verschijnselen opgewekt.

Ten eerste zal er bij een varend schip een zekere waterverplaatsing gaan optreden, welke groter wordt naarmate de snelheid van het schip toeneemt. Bij de boeg van het schip zal bij het varen voortdurend een hoeveelheid water worden verdrongen, terwijl er tegelijkertijd een zelfde hoeveelheid water achter het schip moet worden aangevuld. Hierdoor zal er onder en naast het schip een stroming gaan optreden, welke tegengesteld is aan de vaarrichting van het schip zelf. Deze zogenaamde **retourstroom** gaat gepaard met een (water)**spiegeldaling**; deze samenhangende verschijnselen noemt men de **primaire waterbeweging**.

Het schip vaart als het ware in zijn eigen gemaakte kuil, en zal, gezien zijn gelijkblijvende opwaartse druk en daarmee zijn ondergedompelde gedeelte, dus meezakken. Hierdoor zal het schip bij toenemende vaarsnelheid steeds dieper komen te liggen ten opzichte van de ongestoorde waterspiegel bij een stilliggend schip. De ruimte tussen onderkant schip en de bodem van de vaarweg (de zogenaamde kielspeling, Eng: keelclearance) wordt hierdoor sterk verminderd en in extreme gevallen kan het schip zelfs plaatselijk de bodem raken.

Het hiervoor geschetste stroombeeld rondom een varend schip heeft een sterk driedimensionaal karakter, zeker bij een min of meer onbeperkte breedte en diepte van het vaarwater. Bij beperking van de waterdiepte zal dit stroombeeld steeds meer een tweedimensionaal karakter gaan vertonen. Wanneer de breedte van de vaarweg eveneens sterk wordt beperkt (breedte vaarweg kleiner dan lengte schip), dan krijgt het stroombeeld nagenoeg een **ééndimensionaal** karakter.

Naast de primaire waterbeweging (retourstroom en spiegeldaling) wordt er door een varend schip ook een **secundaire waterbeweging** opgewekt, bestaande uit **scheepsgolven**. De hoogte van de scheepsgolven wordt in sterke mate bepaald door de scheepssnelheid, maar is ook afhankelijk van de vorm en hoofdafmetingen van een schip.

De secundaire waterbeweging wordt echter ook sterk beïnvloed door de grootte van de primaire waterbeweging. Globaal kan gesteld worden dat naarmate de retourstroom en de spiegeldaling groter worden, de invloed van de scheepsgolven steeds verder zal gaan afnemen. Een direkt gevolg hiervan is dat de kleine snelle schepen veelal verantwoordelijk zijn voor de grootste golfaanval op de oevers van een vaarweg, terwijl de grote langzame schepen de grootste stroomaanval ten gevolge van retourstroom en spiegeldaling veroorzaken.

Bij de bestudering van de wisselwerking (interactie) tussen schepen onderling en tussen schip en vaarweg zien we een essentieel verschil in benadering tussen een scheepsbouwkundig ingenieur (maritieme techniek) en een civiel ingenieur (civiele techniek).

Een **scheepsbouwkundig ingenieur** is uiteraard in eerste instantie geïnteresseerd in het schip zelf. De rondom het varende schip opgewekte hydraulische verschijnselen zijn voor hem belangrijk bij de bestudering van **weerstand en voortstuwing** van het schip.

De waterspiegeldaling met de daarbij behorende stroming rondom het schip is alleen van belang in de **direkte omgeving van het schip zelf** in verband met de stromingsweerstand met grenslaagverschijnselen langs de scheepshuid

(onder andere afhankelijk van het Reynoldsgetal), en verder in verband met de toestroming met de daarbij optredende intreesnelheid van het water in de nabijheid van de voortstuwing (schroeven al dan niet in combinatie met met straalbuizen) en de roeren. De scheepsgolven zijn tenslotte belangrijk in verband met de zogenaamde golfweerstand die een varend schip ondervindt, maar ook in verband met de energieverstopping door het opwekken van deze golven.

Door bijzondere scheepsvormen (met bijvoorbeeld bulbstevens of andere boegvormen) en door vermindering van de wandruwheid en de daarmee gepaard gaande beïnvloeding van de grenslaag kan de weerstand van schepen binnen zekere grenzen worden verminderd.

De door de spiegeldaling veroorzaakte extra inzinking van een varend schip (squat), waarbij de inzinking van het achterschip o.a. door de daar aanwezige schoefkuil vaak groter is dan die van de boeg (trim), is van belang in verband met de daarmee gepaard gaande vermindering van de vaardiepte, hetgeen vooral de bestuurbaarheid van het schip sterk ten nadele kan beïnvloeden.

Door schaalvergroting in de binnenscheepvaart worden er steeds grotere en snellere schepen gebouwd, waardoor vooral de beperking van de vaardiepte steeds meer betekenis gaat krijgen. Voor olietankers is bijvoorbeeld de Noordzee reeds lang een vaarwater met beperkte diepte geworden. Wanneer het vaarwater ook nog in de breedte wordt beperkt (bijvoorbeeld de z.g. Eurogeul en het Noordzeekanaal), dan zal de scheepsweerstand gaan toenemen en daarmee de maximale vaarsnelheid nog sterker verminderen, zelfs als het motorvermogen opgevoerd zou worden.

Bij (binnen)scheepvaartkanalen, welke zowel in diepte als in breedte zijn beperkt, is de vaarsnelheidsvermindering door profielbeperking veelal niet van belang voor de scheepsbouwkundige, omdat hier de kanaalbeheerder reglementair meestal een kleinere snelheid als maximum voorschrijft in verband met de toelaatbare stroom- en golfaanval op de oevers en de bodem van het kanaal.

Hiermee zijn we tevens beland bij de problemen welke vooral in de civiele techniek een rol spelen.

Een **civiel ingenieur** is namelijk bij de benadering van het probleem van de hydraulische verschijnselen in scheepvaartkanalen in wezen niet direkt geïnteresseerd in het schip als zodanig.

De retourstroom en spiegeldaling zijn voor hem juist belangrijk in de nabijheid van de kanaaloevers, en in mindere mate bij de kanaalbodem. Op plaatsen waar geen verdediging tegen stroomaanval is aangebracht kan er bij grote retourstroomsnelheden, zeker in combinatie met reeds aanwezige stroomsnelheid op stroomkanalen en rivieren waar scheepvaart op plaatsvindt, erosie gaan optreden.

Indien dit op de bodem van het scheepvaartkanaal het geval is, is dit vaak nog wel acceptabel gezien de geringe verplaatsing van zand, welke alléén plaatsvindt tijdens een scheepspassage. Aangezien er bij stroomloze kanalen in twee richtingen wordt gevaren, zullen de zandverplaatsingen elkaar veelal opheffen.

Dit gaat niet meer op indien er in de ene richting bijna uitsluitend geladen en in de andere richting meestal leeg wordt gevaren, of wanneer er sprake is van stroomvoerende vaarwegen.

Voor oevers geldt weer een ander verhaal, aangezien bij optredend zandtransport het zand ten gevolge van de zwaartekracht altijd benedenwaarts naar de teen van het talud wordt verplaatst. Bij moderne scheepvaartwegen wordt de taludverdediging dan ook doorgezet in de bodem tot even voorbij de teen van het talud. Vooral de scheepsgolven, al of niet in combinatie

met de waterspiegeldaling en de retourstroom nabij de oevers, veroorzaken een sterke aanval op het talud in een gebied om en nabij de waterlijn (golfklappen, evenwijdige en loodrechte stroming, golfoploop, orbitaalbeweging).

Speciaal voor het ontwerp van de oeververdediging op een taludhelling vormen de stroming (retourstroom gekombineerd met de stroomsnelheid ten gevolge van de afvoerfunctie en/of getij), de waterspiegeldaling en de scheepsgolven in samenhang met de hierdoor ontstane grondwaterstroming voor de oeververdediging de noodzakelijke randvoorwaarden.

Deze verschijnselen hangen direkt samen met de vaarsnelheid en de grootte van de maatgevende schepen of combinaties van schepen. De civiel ingenieur zal bij het dimensioneren van het kanaaldwarsprofiel met de daarbij vereiste oeververdediging trachten de toelaatbare vaarsnelheid zoveel mogelijk in overeenstemming te brengen met een voor de scheepvaart economisch gewenste vaarsnelheid.

Kennis van de wisselwerking tussen scheepsbewegingen en kanaaldwarsprofiel, met de daaruit resulterende hydraulische verschijnselen, is dan ook van het grootste belang voor de verkeerswaterbouwkundige, speciaal als het gaat over het ontwerpen van havens en scheepvaartwegen.

3.2. Primaire waterbeweging

De waterbeweging rondom varende schepen is uiterst gekompliceerd, speciaal door de driedimensionale stroming langs de scheepshuid, onder en naast het schip. De vorm van vooral binnenschepen met hun veelal volle vorm (grote grootspant- en blokcoëfficiënt) veroorzaakt geen ideaal stroombeeld rondom het schip. Verder spelen de aanwezigheid van het vrije wateroppervlak en vooral de beperkingen van de breedte en de diepte van een vaarweg een grote rol.

Door Thiel [4] is in 1974 een poging gedaan om een driedimensionaal model in numerieke vorm uit te werken, gebaseerd op een potentiaal-theoretische benadering van de stroming rond een varend schip. Het Waterloopkundig Laboratorium [5] heeft in 1978 een tweedimensionaal numeriek stromingsmodel ontwikkeld, met een gemodificeerd bestaand Leenderse-programma, gebaseerd op een lange golf-benadering. De resultaten van deze modellen hebben echter weinig bevredigende resultaten opgeleverd.

Van veel oudere datum zijn de **ééndimensionale rekenmethoden**. In het begin van deze eeuw werd door Thiele [6] in 1901 en door Krey [7] in 1913 en later door Kreitner [8] in 1934 reeds een eenvoudig ééndimensionaal model gepresenteerd.

Het grote voordeel van de ééndimensionale benadering is dat uitgegaan wordt van een eenvoudig hydraulisch model waarvoor een exacte analytische oplossing is af te leiden. Het model is hierdoor veel beter inzichtelijk en toegankelijk, en het levert voor een aantal fenomenen voldoende kwantitatieve toepassingsmogelijkheden op.

Prof. H. Krey bijvoorbeeld beschouwde een kanaaldoorsnede $A(x)$ op een afstand x van de boeg (zie figuur 3.1).

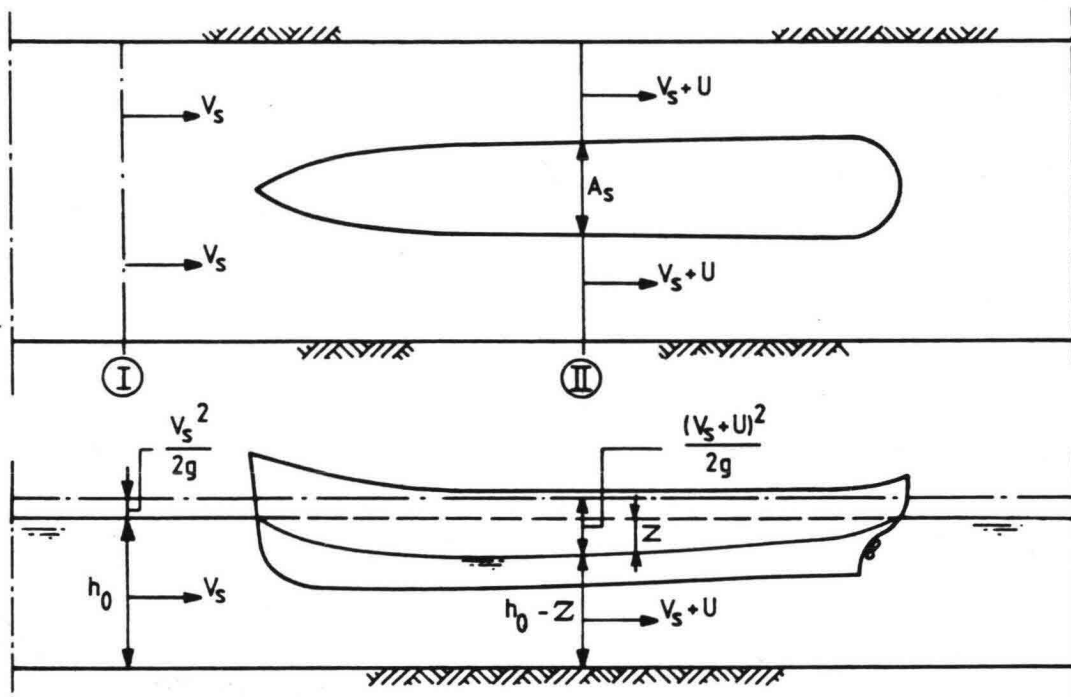
Wanneer nu de waterdeeltjes in deze doorsnede $A(x)$ een ten opzichte van de oever naar achter gerichte snelheid $u(x)$ hebben en deze doorsnede $A(x)$ als vast assenkruis op het schip met de vaarsnelheid V_s wordt voortbewogen, dan bedraagt de watermassa die deze doorsnede per tijdseenheid passeert:

$$\rho_w \cdot Q = \rho_w \cdot A(x) \cdot \{V_s + u(x)\} \quad (1)$$

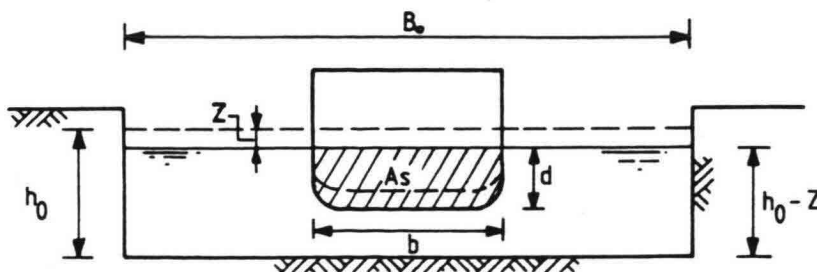
Om te voldoen aan de continuïteitsvoorwaarde geldt voor het eerste geval, ter plaatse van het grootspant A_S (zie figuur 3.1):

$$Q' = V_S \cdot \{A_S + B_O \cdot Z\} = U \cdot \{A_C - A_S - B_O \cdot Z\} \quad (5)$$

- met $A_C = B_O \cdot h_0 =$ oppervlak ongestoord kanaalprofiel (m^2)
 $A_S = b \cdot d =$ oppervlak ondergedompelde gedeelte grootspant (m^2)
 $h_0 =$ waterdiepte ongestoord kanaal (m)
 $B_O =$ waterspiegelbreedte ongestoord kanaal (m)
 $b =$ breedte schip ter plaatse van grootspant (m)
 $d =$ diepgang schip ter plaatse van grootspant (m)
 $V_S =$ vaarsnelheid van het schip (m/s)
 $Z =$ maximale spiegeldaling ter plaatse van grootspant (m)
 $U =$ maximale retourstroom rondom het schip t.p.v. grootspant (m/s)



Figuur 3.2. Meebewegend assenstelsel



Figuur 3.3. Dwarsprofiel ter plaatse van het grootspant

Ditzelfde resultaat wordt gevonden door aan de continuïteitsvoorwaarde voor het tweede geval (meebewegend assenstelsel) te voldoen. Toegepast op doorsnede I en II van figuur 3.2 wordt dan gevonden:

$$Q = V_s \cdot A_c = \{V_s + U\} \cdot \{A_c - A_s - B_o \cdot Z\} \quad (5a)$$

Bij de ééndimensionale benadering worden de volgende aannamen gedaan:

- Recht, oneindig lang prismatisch kanaalvak.
- Prismatisch grootspant wordt als geldend over de volle lengte van het schip genomen.
- Konstante vaarsnelheid van het schip.
- Uniforme retourstroom over de gehele natte vaarwegdoorsnede, naast en onder het schip.
- Uniforme spiegeldaling over de totale breedte van het kanaal.
- Inzinking van het schip gelijk aan de waterspiegeldaling.
- Geen vertrimming van het schip aanwezig.
- Geen energieverliezen; wrijvingsweerstand en vertragingverliezen worden verwaarloosd.
- Geen invloed van scheepsgolven, schroefstroom en schroefkuil (ter plaatse van de voortstuwing).

De ééndimensionale methoden kunnen verdeeld worden in twee hoofdkategorieën, te weten:

- a. Methoden gebaseerd op de wet van behoud van energie.
- b. Methoden gebaseerd op de wet van behoud van impuls.

3.2.1. Methode met behoud van energie

Naast de reeds behandelde energiemethode van prof. H. Krey is voor Nederland het door Schijf [9] in 1949 en door Jansen/Schijf [10] in 1953 uitgevoerde onderzoek in zoverre baanbrekend geweest, dat daarin voor het eerst de ééndimensionale energiemethode is toegepast op verkeerswaterbouwkundige vraagstukken. Bij dit onderzoek werd ook het bestaan van de zogenaamde **natuurlijke grenssnelheid** aangetoond. Schijf ging hierbij uit van dezelfde schematisatie als in de figuren 3.2 en 3.3 is weergegeven. Met de beide vergelijkingen (4a) en (5a) werden enige wiskundige bewerkingen uitgevoerd. In deze twee vergelijkingen komen slechts twee onbekenden (Z en U) voor en door één van de twee te elimineren ontstaan vergelijkingen met slechts één onbekende. Bij het invoeren van dimensieloze grootheden ontstaan dan de volgende twee vergelijkingen:

$$1 - A_s/A_c - Z/\bar{h} - \left\{ 1 + \frac{4 \cdot Z/\bar{h}}{V_s^2/g \cdot \bar{h}} \right\}^{-1/2} = 0 \quad (6)$$

$$1 - A_s/A_c - \frac{1}{2} \cdot V_s^2/g\bar{h} \cdot \left[\left\{ 1 - \frac{U/\sqrt{g\bar{h}}}{V_s/\sqrt{g\bar{h}}} \right\} - 1 \right]^2 - \left\{ 1 + \frac{U/\sqrt{g\bar{h}}}{V_s/\sqrt{g\bar{h}}} \right\}^{-1} = 0 \quad (7)$$

Met $\bar{h} = A_c/B_o$ = de gemiddelde waterdiepte van de vaarweg,
 en B_o = de waterspiegelbreedte bij ongestoorde waterstand.

De natuurlijke grenssnelheid, dit is de maximaal mogelijke vaarsnelheid (V_{gr}) voor een bepaald schip in een begrensde vaarweg met gegeven afmetingen, wordt gevonden door de maximale afvoer (Q_{max}) welke langs het schip kan worden afgevoerd te bepalen met behulp van vergelijkingen (5a) en (4a):

$$Q_{\max} = V_{gr} \cdot A_c = \{V_{gr} + U\} \cdot \{A_c - A_s - B_o \cdot Z\}$$

$$\text{en } \{V_{gr} + U\} = \{V_{gr}^2 + 2 \cdot g \cdot Z\}^{1/2}$$

Hieruit volgt:

$$Q_{\max} = \{V_{gr}^2 + 2 \cdot g \cdot Z\}^{1/2} \cdot \{A_c - A_s - B_o \cdot Z\} \quad (8)$$

De grenssnelheid wordt bepaald door $dQ/dZ = 0$, oftewel

$$\frac{dQ}{dZ} = g \cdot \{V_{gr}^2 + 2 \cdot g \cdot Z\}^{-1/2} \cdot \{A_c - A_s - B_o \cdot Z\} - B_o \cdot \{V_{gr}^2 + 2 \cdot g \cdot Z\}^{1/2} = 0$$

Na eliminatie van Z via vergelijking (6) en met $Fr = V_{gr}/\sqrt{gh}$ geeft dit:

$$1 - A_s/A_c + \frac{1}{2} \cdot Fr^2 - \frac{3}{2} \cdot Fr^{2/3} = 0 \quad (9)$$

Vergelijking (9) levert voor de beide uitersten van A_s/A_c :

$$A_s/A_c = 0 \rightarrow Fr = 1 \rightarrow V_{gr} = \sqrt{gh}$$

$$A_s/A_c = 1 \rightarrow Fr = 0 \rightarrow V_{gr} = 0$$

Voor het toepassingsgebied voor binnenscheepvaartkanalen (dat wil zeggen voor $0,1 < A_s/A_c < 0,3$) geldt bij benadering:

$$Fr = 0,78 \cdot [1 - A_s/A_c]^{2,25} \quad (9a)$$

Bij de grenssnelheid geldt verder de relatie:

$$\frac{V_{gr} + U_{gr}}{\sqrt{g \cdot A_c' / B_o}} = 1 \quad \text{of} \quad \frac{V_{gr}}{\sqrt{gh}} + \frac{U_{gr}}{\sqrt{gh}} = \left[1 - \frac{A_s}{A_c} - \frac{Z_{gr}}{h}\right]^{1/2} \quad (9b)$$

Hieruit volgt voor de waarde van de spiegeldaling en de retourstroom:

$$Z_{gr}/\bar{h} = \frac{1}{3} \cdot \left[1 - A_s/A_c - V_{gr}^2/gh\right] \quad (10)$$

en

$$U_{gr}/\sqrt{gh} = \left[\frac{2}{3} \cdot \left\{1 - \frac{A_s}{A_c} + \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{gr}^2}{gh}\right\} \right]^{1/2} - \frac{V_{gr}}{\sqrt{gh}} \quad (11)$$

In figuur 3.4 zijn V_{gr}/\sqrt{gh} , Z_{gr}/\bar{h} en U_{gr}/\sqrt{gh} als functie van A_s/A_c uitgezet.

Ter voorbereiding op de in 1953 uitgebrachte bijdrage voor het 18^e internationale scheepvaartcongres in Rome, had het Waterloopkundig Laboratorium in Delft (model)proeven uitgevoerd om de voorgaande theorie te toetsen [11]. Aangezien de metingen niet geheel in overeenstemming bleken met de theorie werd er alléén in vergelijking (4a) een korrektiecoëfficiënt α ingevoerd:

*beno-
dering
fig 3.4
en vgl (9)*

$$Z = \alpha \cdot \frac{(V_s + U)^2}{2g} - \frac{V_s}{2g} \quad (12)$$

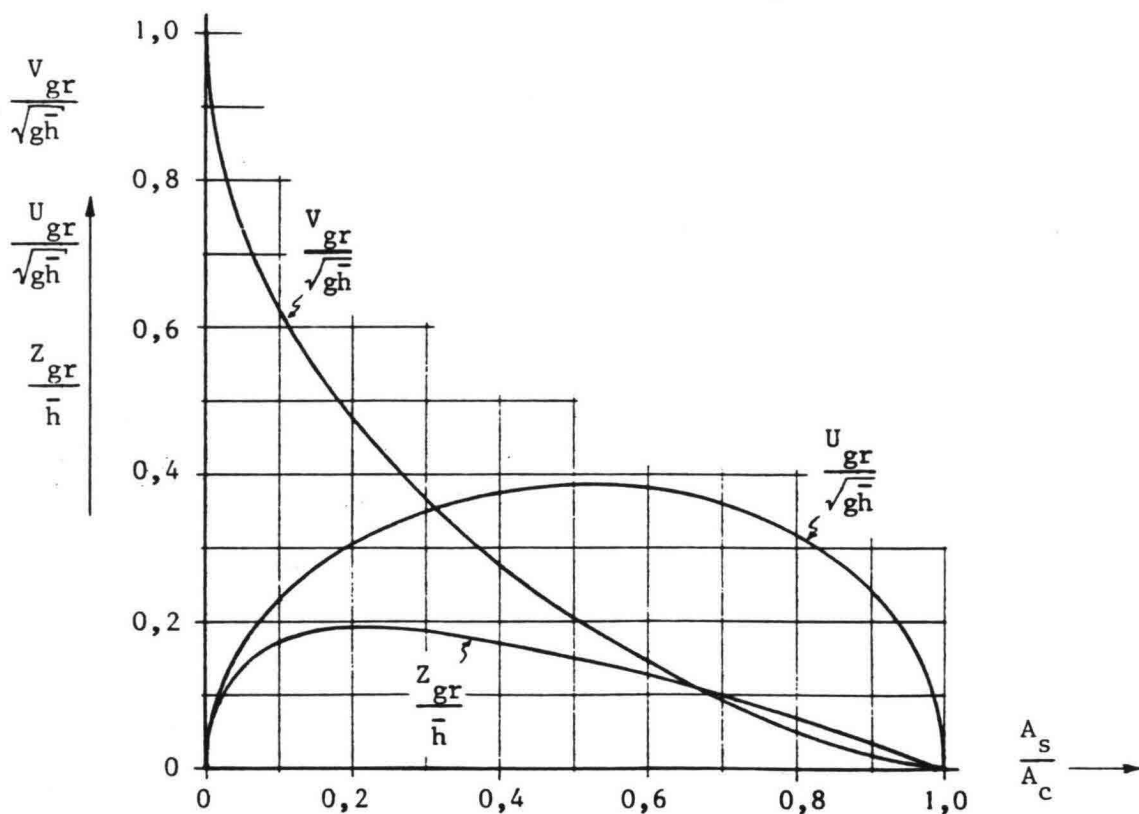
In de theoretische afleiding wordt namelijk naast en onder het schip een regelmatige snelheidsverdeling (U) aangenomen.

De grootte van deze α -coëfficiënt varieerde tussen de 1,05 en 1,2.

In eerste instantie werd dan ook uitgegaan van $\alpha = 1,1$. Deze korrektie-coëfficiënt levert een grotere spiegeldaling en retourstroom op ten opzichte van de oorspronkelijke theorie van Schijf, waarin in feite $\alpha = 1$ werd verondersteld. In latere publikaties van het Waterloopkundig Laboratorium wordt deze α -coëfficiënt ook wel gegeven als functie van de grenssnelheid (V_{gr}), omdat dit beter zou aansluiten op de meetresultaten:

$$\alpha = 1,4 - 0,4 \cdot V_s / V_{gr} \quad (13)$$

Voor een waarde van $V_s / V_{gr} = 0,75$ geldt dan: $\alpha = 1,1$.



Figuur 3.4. Grenswaarden volgens de theorie van Schijf

Door de vergelijkingen (6) en (5) in een andere vorm te schrijven, n.l.:

$$\frac{V_s}{\sqrt{gh}} = \left[\frac{2 \cdot Z/\bar{h}}{\alpha \cdot \{1 - A_s/A_c - Z/\bar{h}\}^2 - 1} \right]^{1/2} \quad (14)$$

en

$$\frac{U}{\sqrt{gh}} = \left[\frac{1}{1 - A_s/A_c - Z/\bar{h}} - 1 \right] \cdot \frac{V_s}{\sqrt{gh}} \quad (15)$$

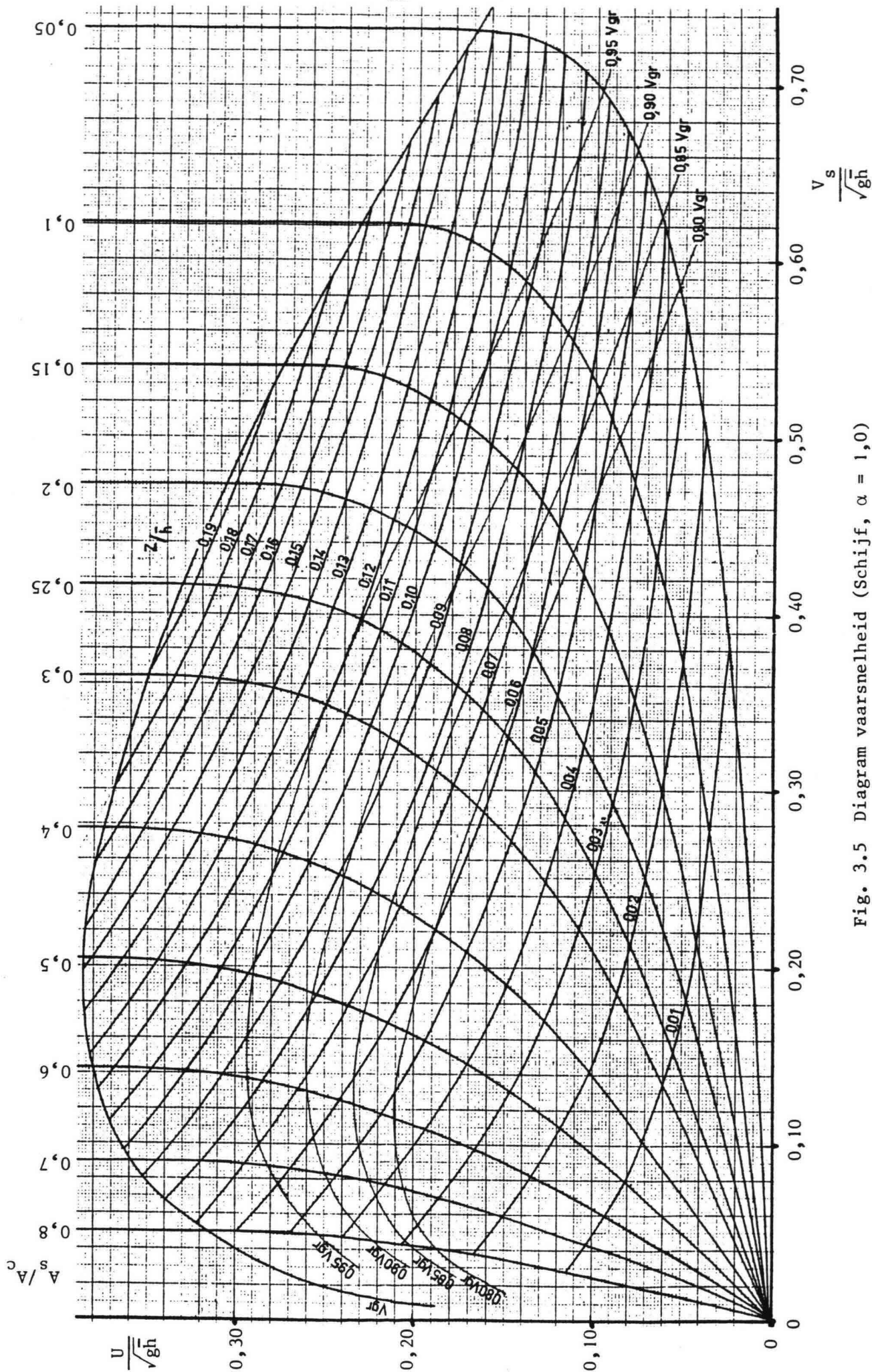


Fig. 3.5 Diagram vaarsnelheid (Schijf, $\alpha = 1,0$)

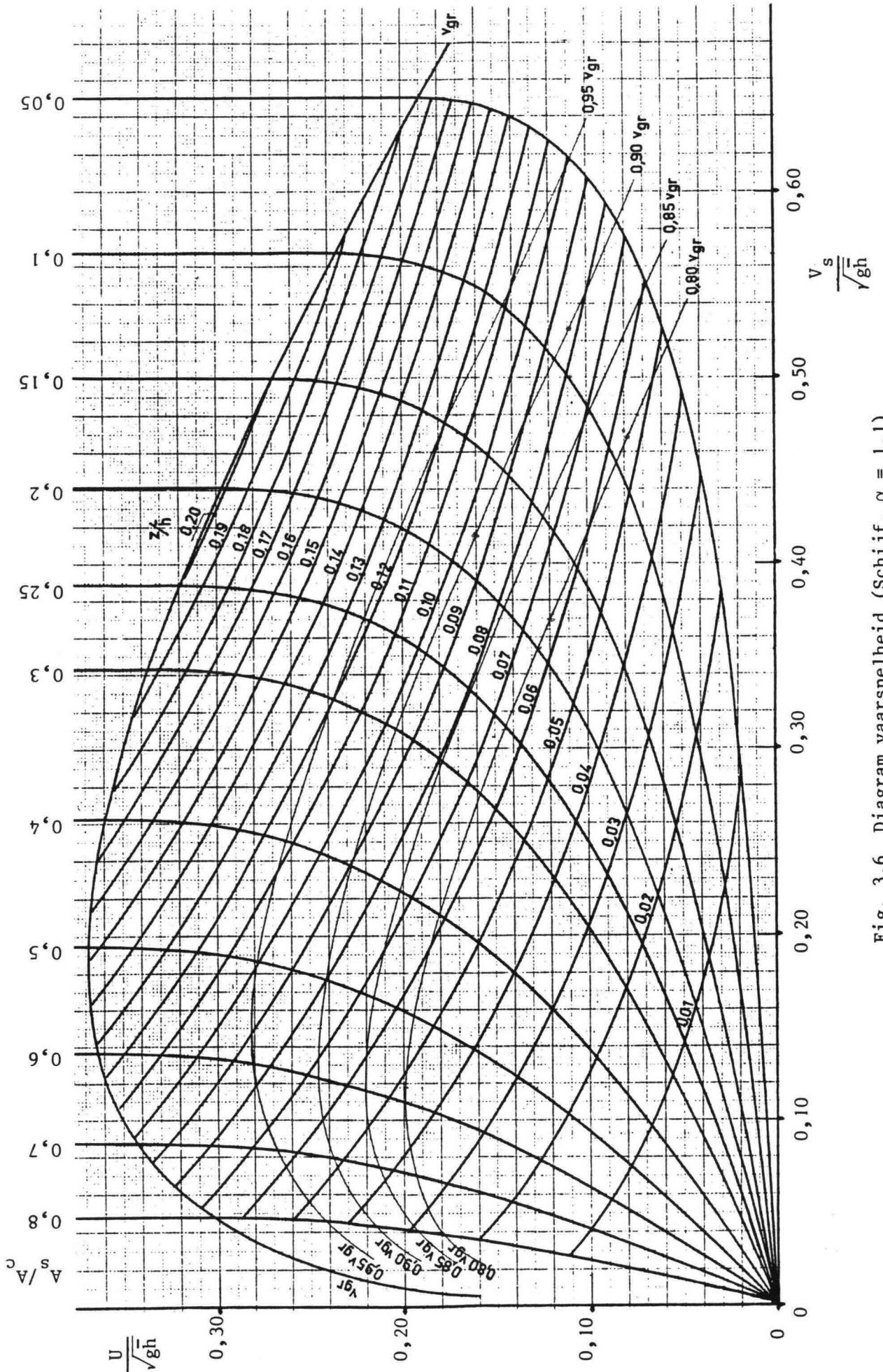


Fig. 3.6 Diagram vaarsnelheid (Schiff, $\alpha = 1,1$)

kan een diagram worden opgezet, door eerst uit te gaan van $A_S/A_C = \text{konstant}$ en Z/\bar{h} te laten variëren en daarna uit te gaan van $Z/\bar{h} = \text{konstant}$ en A_S/A_C te laten variëren. Het resultaat is dus een stelsel van lijnen met $A_S/A_C = \text{konstant}$ en $Z/\bar{h} = \text{konstant}$.

In de figuren 3.5 en 3.6 zijn op deze manier, voor een globale bepaling van de gezochte dimensieloze grootheden, voor de gevallen $\alpha = 1$ respectievelijk $\alpha = 1,1$ de resultaten grafisch weergegeven.

Opm: De invoering van de correctiecoëfficiënt α zoals hiervoor behandeld is fysisch gezien niet erg logisch. Ten eerste wordt de correctiecoëfficiënt voor onregelmatige snelheidsverdeling alléén maar in de bewegingsvergelijking (4a) als correctie op de snelheidshoogte ingevoerd en niet in de continuïteitsvergelijking (5). Ten tweede is de correctiecoëfficiënt α , door deze voor de term $(V_S + U)$ te plaatsen, niet alleen op de retourstroom (U) maar ook op de constante vaarsnelheid (V_S) van toepassing.

Dit laatste is zeker niet juist, aangezien de vaarsnelheid, weliswaar als relatieve snelheid ingevoerd, een konstante waarde heeft. Theoretisch zou het beter geweest zijn indien er zowel in de continuïteits- als in de bewegingsvergelijking rekening werd gehouden met de invoering van een correctiecoëfficiënt op de gemiddelde retourstroomsnelheid ($\alpha'U$).

Het door Schijf/Jansen uitgewerkte ééndimensionale hydraulische model heeft als beperking dat het in eerste instantie is opgezet voor **rechthoekige kanalen**. Dit geldt tevens voor de reeds eerder genoemde auteurs Krey [7] en Kreitner [8], die eveneens van de energiemethode zijn uitgegaan. Ook het werk van Constantine [12], [13] moet in dit verband worden genoemd. Deze onderscheidt drie gebieden ten aanzien van de aanstroming van het schip: het subkritische, het kritische en het superkritische gebied. Hiervan zijn speciaal de laatste twee gebieden alleen onder speciale laboratorium omstandigheden realiseerbaar, en zodoende in feite alleen van academisch belang. Ook Hughes [14] gaat bij zijn beschouwingen uit van een rechthoekig kanaalprofiel.

Het oplossen van de twee onbekenden, namelijk de spiegeldaling (Z) en de retourstroom (U), uit de vergelijkingen (14) en (15), bij bekend veronderstelde waterbreedte- en diepte van het kanaal naast vaarsnelheid en grootspantafmetingen van het schip, leidt tot relatief eenvoudige uitdrukkingen. Indien het kanaalprofiel echter een andere vorm heeft, dient er een extra vormparameter te worden ingevoerd.

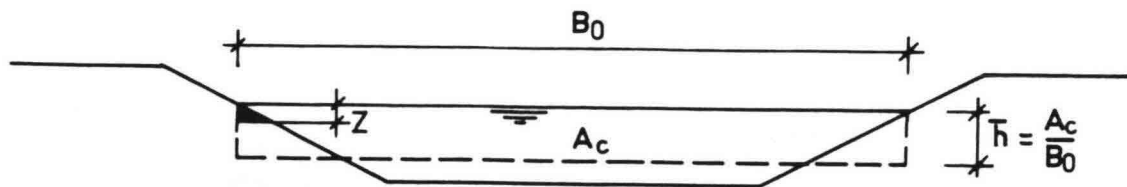
Voor een **trapeziumvormig profiel** is onder andere door Tothill [15] en McNown [16] een analytisch exacte oplossing afgeleid. McNown heeft daarbij ook nog een analytisch exacte oplossing voor parabolische kanaalvormen (zogenaamde machtsprofielen) bepaald.

Bij nadere analyse blijkt dat de trapeziumvorm toegepast door Tothill en het machtsprofiel van McNown, uitgaande van eenzelfde kanaaloppervlak en waterspiegelbreedte, precies dezelfde resultaten opleveren mits de helling van het talud ter plaatse van de waterlijn in beide gevallen maar gelijk is.

Toch is het met een eenvoudige schematisatie ook met de methode Schijf e.a. mogelijk om van een trapeziumvormig kanaal uit te gaan. In principe geldt deze methode voor elke willekeurige vorm van het kanaalprofiel. De trapeziumvorm wordt daarbij geschematiseerd tot een rechthoek, waarbij het natte kanaaloppervlak en de waterspiegelbreedte gelijk blijven (zie figuur 3.7). De berekening kan dan worden toegepast op het geschematiseerde

rechthoekige dwarsprofiel, waarvan de (fictieve) gemiddelde waterdiepte gelijk is aan:

$$\bar{h} = A_c / B_0 \quad (16)$$



Figuur 3.7. Gemiddelde waterdiepte bij een trapeziumvormig kanaalprofiel

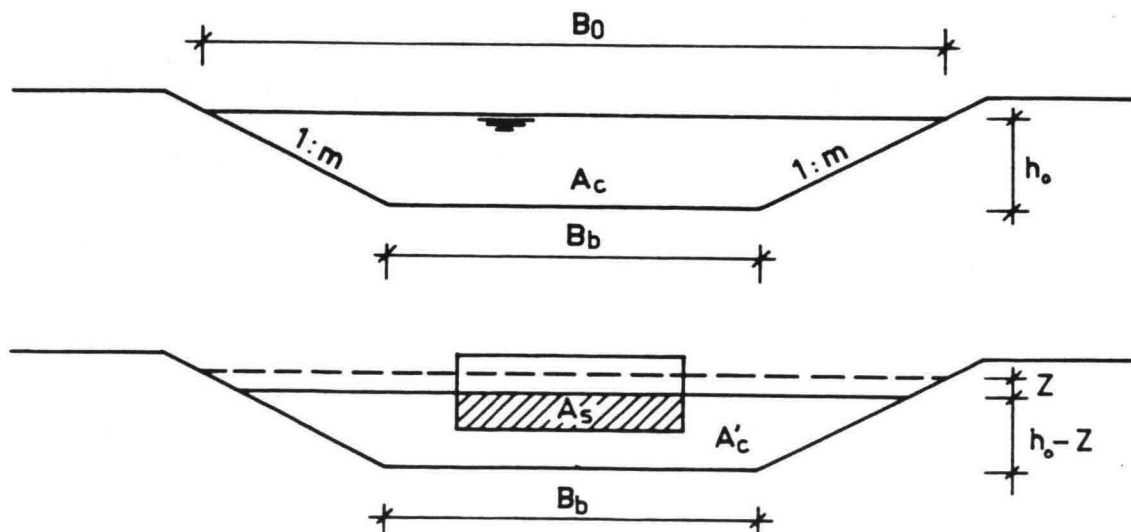
De fout die bij deze schematisatie wordt gemaakt hangt sterk af van de taludhelling (m), de waterspiegelbreedte (B_0) en de grootte van de spiegel-daling (Z). De gemaakte fout in doorstroomoppervlak bij scheepspassage is namelijk:

$$m \cdot Z^2 \quad \text{ten opzichte van} \quad A_c - A_s - B_0 \cdot Z$$

Voor kanalen met een blokkagefactor $k = A_c / A_s > 10$ bedraagt de fout ten gevolge van deze schematisatie slechts 1 à 2%. Bij kleinere blokkagefactoren kan deze oplopen tot ca. 5%.

Uitgaande van de energiemethode van Tothill voor trapeziumvormige kanaalprofielen (zie figuur 3.8) luidt de continuïteitsvergelijking:

$$A_c \cdot V_s = A'_c \cdot (V_s + U) \quad \text{of} \quad (V_s + U) / V_s = A_c / A'_c \quad (17)$$



Figuur 3.8. Dwarsprofielen bij een trapeziumvormig kanaalprofiel

$$\text{Hierin is } A_c = B_b \cdot h_0 + m \cdot h_0^2 \quad (18)$$

$$A'_c = B_b \cdot (h_0 - Z) + m \cdot (h_0 - Z)^2 - A_s \quad (19)$$

De bewegingsvergelijking (4a) volgens Bernoulli gaat met verg. (17) over in:

$$Z = \frac{V_s^2}{2g} \cdot \left[\left\{ \frac{A_c}{A'_c} \right\}^2 - 1 \right] \quad (20)$$

Uit de vergelijkingen (18) en (19) volgt nu:

$$\frac{A'_c}{A_c} = \frac{B_b \cdot (h_0 - Z) + m \cdot (h_0 - Z)^2 - A_s}{B_b \cdot h_0 + m \cdot h_0^2} \quad (21)$$

Voor een gegeven kanaalprofiel zijn B_b , h_0 en m gegeven grootheden. Indien het grootspantoppervlak (A_s) verder bekend is, dan blijkt uit vergelijking (21) dat de verhouding A'_c/A_c alleen nog maar een functie van de spiegeldaling (Z) is. Met vergelijking (20) wordt dan het verband met de vaarsnelheid (V_s) gelegd, waarna via vergelijking (17) een verband met de retourstroom (U) wordt gegeven.

Door Balanin en Bykov [17] wordt, uitgaande van de energiemethode, een 1e orde benadering toegepast door in vergelijking (5a) de term $\{B_b \cdot Z\}$ ten opzichte van de term $\{A_c = B_b \cdot h\}$ te verwaarlozen ($Z/h \ll 1$), waardoor voor de retourstroom de volgende eenvoudige uitdrukking ontstaat:

$$U = \frac{A_s}{A_c - A_s} \cdot V_s = \frac{1}{A_c/A_s - 1} \cdot V_s \quad (22)$$

Door in deze uitdrukking vergelijking (4a) te substitueren gaat deze over in:

$$Z = \frac{U^2}{g} \cdot \left\{ \frac{V_s}{U} + 0,5 \right\} = \frac{V_s^2}{g} \cdot \frac{A_c/A_s - 0,5}{(A_c/A_s - 1)^2} \quad (23)$$

Met deze eerste orde benadering is een goed inzicht te krijgen en zijn Z en U rechtstreeks te berekenen als de vaarsnelheid (V_s) en de blokkagefactor ($k = A_c/A_s$) bekend zijn.

De resultaten van Tuck [26] kunnen eveneens worden gevonden door verwaarlozing van de tweede orde term ($U/V_s \ll 1$) in vergelijking (4a) en vergelijking (5a). Hieruit volgt dan:

$$Z = U \cdot V_s / g \quad (4b) \quad \text{en} \quad V_s \cdot (A_s + B_b \cdot Z) = U \cdot (A_c - A_s) \quad (5b)$$

Met $Fr = V_s / \sqrt{gh}$ en na eliminatie van Z wordt gevonden:

$$\frac{U}{\sqrt{gh}} = \frac{A_s/A_c}{1 - A_s/A_c - Fr^2} \cdot Fr \quad (22a) \quad \text{en} \quad \frac{Z}{h} = \frac{A_s/A_c}{1 - A_s/A_c - Fr^2} \cdot Fr^2 \quad (23a)$$

Indien verder $A_s/A_c \ll 1$ dan volgen de door Tuck gevonden uitdrukkingen:

$$\frac{U}{\sqrt{gh}} = \frac{A_s/A_c}{1 - Fr^2} \cdot Fr \quad (22b) \quad \text{en} \quad \frac{Z}{h} = \frac{A_s/A_c}{1 - Fr^2} \cdot Fr^2 \quad (23b)$$

Tot vaarsnelheden $V_s < 0,5.V_{gr}$ wijken de resultaten maar weinig af. Voor toegangsgeulen bij havens en dergelijke, waar de vaarsnelheden gering zijn, is deze benadering veelal aanvaardbaar.

Voor grotere vaarsnelheden kan verdere verfijning via iteratie met behulp van de oorspronkelijke vergelijkingen (4a) en (5a) worden verkregen.

In de voorgaande beschouwingen is de **wrijvingsinvloed** buiten beschouwing gelaten, aangezien deze van ondergeschikt belang is gebleken. Zo heeft prof. H. Krey [7] een wrijvingscorrectie ingevoerd ten gevolge van de waterstroming langs het schip ($V_s + U$), en die langs de bodem en oevers van de vaarweg (U). De hierdoor veroorzaakte extra spiegeldaling bleek echter niet groter te zijn dan 3%. Hieruit blijkt dat de wrijving volledig overheerst wordt door de traagheidsverschijnselen.

Door Gates en Herbich [18], die eveneens zijn uitgegaan van de energiemethode, is de invloed van de wrijving in rekening gebracht door de optredende grenslagen langs scheepshuid en kanaaloevers en -bodem in beschouwing te nemen. Dit door het doorstromingsprofiel rondom het schip te verkleinen zodat er grotere, meer met de praktijk overeenkomende, waarden voor de retourstroom (U) en de spiegeldaling (Z) worden gevonden.

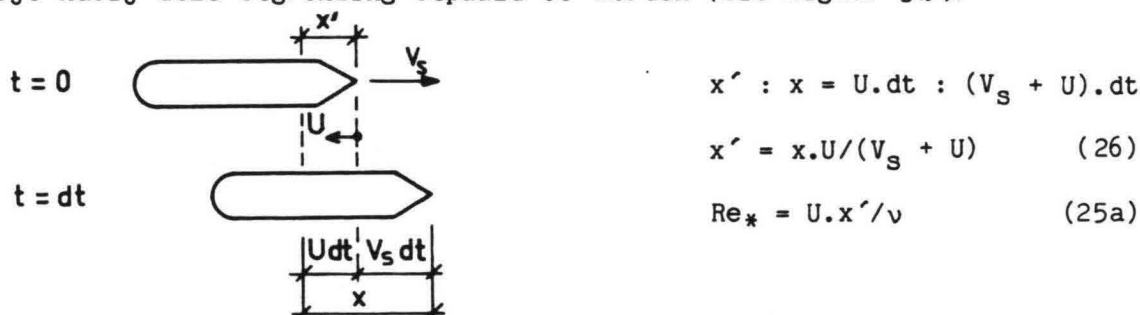
Als verdringingsdikte langs de scheepshuid is uitgegaan van:

$$\delta^* = 0,046.x.Re_*^{-1/5} \quad (24)$$

Hierin is x de afstand van de beschouwde doorsnede tot de boeg, en

$$Re_* = \{V_s + U\}.x/\nu \quad (25)$$

Bij het berekenen van de verdringingsdikte van de bodem en de taluds van het kanaal dient allereerst de zogenaamde loopweg (x') van een waterdeeltje nabij deze begrenzing bepaald te worden (zie figuur 3.9).

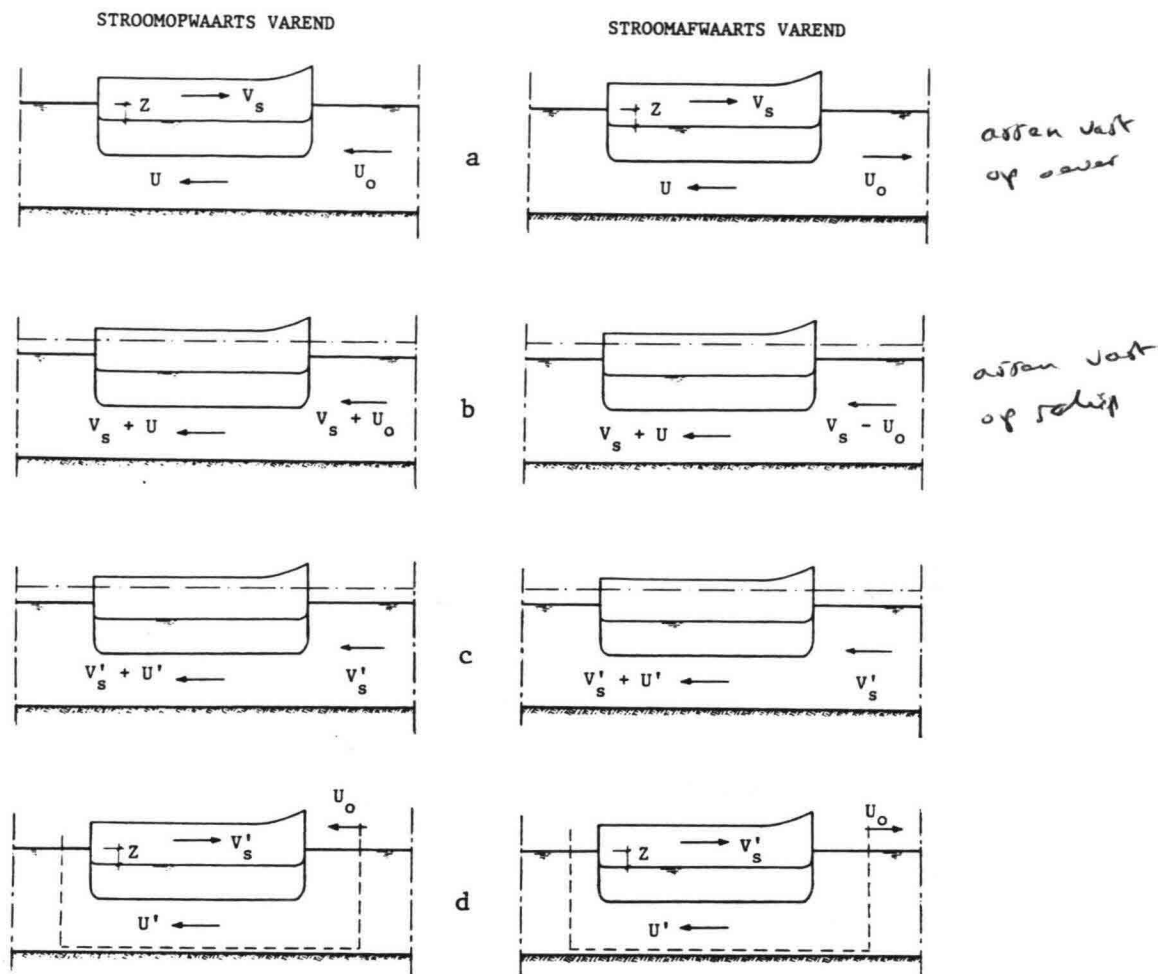


Figuur 3.9. Loopweg van een waterdeeltje

Op iedere gewenste doorsnede x kan nu met bovenstaande formules een correctie op het doorstromingsprofiel (A_C) rondom het schip worden bepaald. Uit modelproeven is verder gebleken dat de grenslagen langs schip en kanaalbodem elkaar gaan beïnvloeden, indien de kielspeling (keelclearance) erg klein wordt. In de praktijk komt dit pas voor indien de kielspeling minder dan 0,5 m is.

Stroomvoerende scheepvaartkanalen

Onder andere door Graewe [19] is de energiemethode ook toegepast op stroomvoerende vaarwegen. Hiervoor loopt de berekening analoog aan het voorgaande, met dien verstande dat nu gerekend wordt met relatieve snelheden ten opzichte van het stromende water in het ongestoorde kanaalprofiel (dus zonder schip).



Figuur 3.10. Stroomvoerend scheepvaartkanaal

Indien sprake is van een stroomvoerend scheepvaartkanaal is veelal de snelheid van het schip ten opzichte van de oevers (V_s) en de stroomsnelheid in het ongestoorde kanaalprofiel ten opzichte van de oevers (U_o) bekend, en is men geïnteresseerd in de retourstroomsnelheid ten opzichte van de oevers (U) en de speldaling (Z). Zie figuur 3.10 a: assenstelsel vast aan de oever.

Indien wordt overgegaan op een meebewegend assenstelsel (vast aan het schip), dan worden de relatieve snelheden gevonden door op elke snelheid V_s te superponeren (figuur 3.10 b); hernoemen geeft dan figuur 3.10 c, met

$$V'_s = V_s + U_o \quad \text{en} \quad U' = U - U_o$$

Als laatste stap wordt het assenstelsel met de snelheid van het ongestoorde water meebewogen (figuur 3.10 d). Dit kan men zich voorstellen door om het schip een aquarium met stilstaand water te denken, waarbinnen het schip met een snelheid V'_s vaart (dus ten opzichte van het aquarium). Het aquarium zelf beweegt zich met de stroomsnelheid U_o ten opzichte van de oevers.

Binnen het aquarium zijn de retourstroomtheoriën zoals deze zijn afgeleid voor niet-stroomvoerende kanalen geldig (Schijf e.a.), met dien verstande dat in de betreffende vergelijkingen met de relatieve snelheden wordt gewerkt, dus met V'_s en U' in plaats van met V_s en U . Dit betekent dat bij de bepaling van de echte optredende retourstroom ten opzichte van de oevers (U) de gevonden waarde U' nog gecorrigeerd moet worden volgens

$$U = U' + U_0 \quad \text{of} \quad U = U' - U_0$$

voor een stroomop- respectievelijk stroomafwaarts varende schip.

De bij de relatieve snelheden berekende spiegeldaling (Z) is tevens de werkelijk optredende spiegeldaling.

Opm.: Men zou verwachten dat een schip, varende met konstant motorvermogen stroomopwaarts, een iets lagere relatieve snelheid heeft ten opzichte van het water dan een schip, dat stroomafwaarts vaart. Dit in verband met het overwinnen van de zwaartekrachtcomponent ten gevolge van het verhang (z.g. vervallweerstand, zie figuur 3.12). Een vrij stroomafwaarts drijvend schip gaat sneller dan het omringende water (door schippers **stevelen** genoemd). Dit wordt o.a. veroorzaakt door het feit dat de turbulente schuifspanning tussen twee waterlaagjes veel sterker is dan tussen scheepsbodem en water. Zie ook Francis [20].

Uit het modelonderzoek in het Waterloopkundig Laboratorium M1115 werd dit zogenaamde "afstevelen" inderdaad bevestigd [21]. Uit dit onderzoek bleek echter ook dat de relatieve snelheid van een stroomopvarende schip juist iets groter was dan van een stroomafvarende schip. Een verklaring hiervoor kan zijn dat de relatieve snelheid ter plaatse van de scheepsbodem, welke bij geladen schepen anders is dan bij de gemiddelde stroomsnelheid over de vertikaal, hiervoor verantwoordelijk is. Door de wrijving bij afstromende waterlopen ontstaat namelijk een logaritmische snelheidsverdeling over de vertikaal, waarbij de gemiddelde stroomsnelheid op ca. 0,4 maal de waterdiepte vanaf de bodem optreedt. In dit verband kan ook worden gewezen op onderzoeken van Sturtzel [22].

Een uitgebreide literatuurstudie over de energiemethoden is gegeven in het afstudeerwerk van Conradie [23].

3.2.2. Methode met behoud van impuls

Door Sharp en Fenton [24] werd voor rechthoekige kanaalprofielen een methode ontwikkeld ter bepaling van de spiegeldaling en de retourstroom gebaseerd op het principe van behoud van impuls.

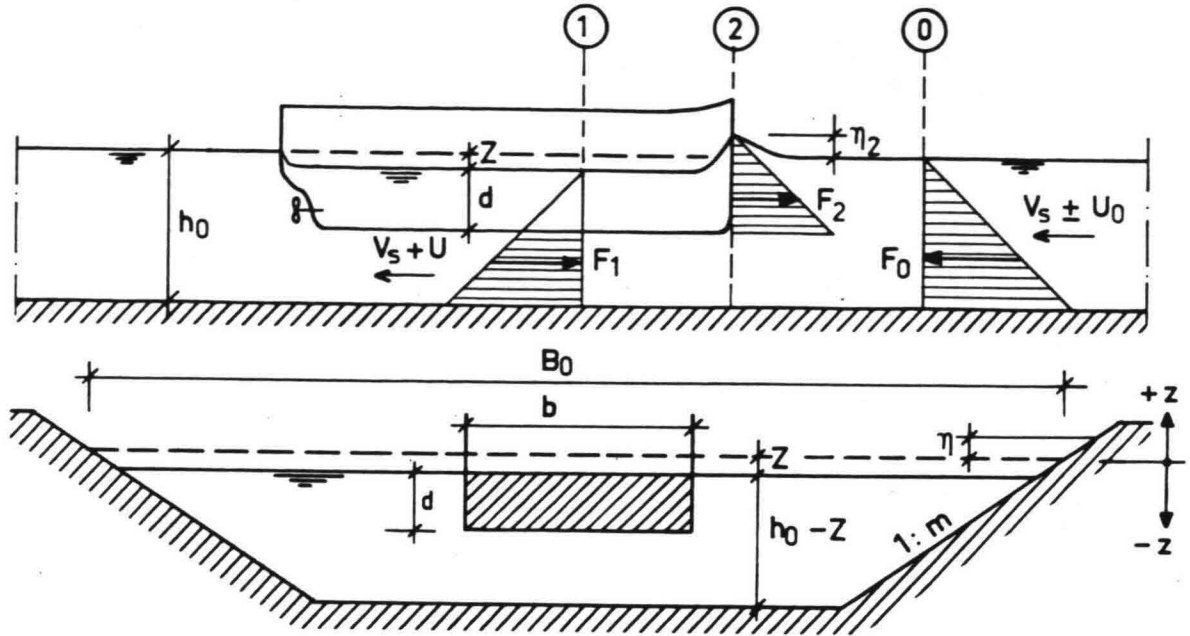
Aangezien de methode Bouwmeester [25] uitgaat van een trapeziumvormig kanaalprofiel en tevens rekening houdt met de krachten ten gevolge van de opstuwung van water bij de boeg van het schip, zal deze methode eerst worden behandeld. Zoals zal blijken kan de methode Sharp en Fenton worden opgevat als een bijzonder geval van de methode Bouwmeester.

Voor het in figuur 3.11 gegeven trapeziumvormig dwarsprofiel geldt voor de breedte, respectievelijk de waterdruk over deze breedte, op hoogte z :

$$B_z = B_0 + 2.m.z \quad (27)$$

$$P_z = \rho_w \cdot g \cdot (\eta - z) \cdot B_z \quad (28)$$

Hierin is η het waterspiegelniveau boven het ongestoorde kanaalpeil met een breedte B_0 ver voor het schip gelegen.



Figuur 3.11. Definitieschets methode Bouwmeester

Het oppervlak van een dwarsdoorsnede en de daarvoor geldende hydrostatische druk in de lengterichting van het kanaal kunnen worden verkregen door integratie van de vergelijkingen (27) en (28):

$$A_x = \int_{-h_0}^{\eta} \{B_0 + 2.m.z\}.dz \quad (29)$$

$$F_x = \int_{-h_0}^{\eta} \rho_w \cdot g \cdot (\eta - z) \cdot \{B_0 + 2.m.z\}.dz \quad (30)$$

Voor kanaaldoorsnede 0 ($\eta = 0$) geldt dan:

$$A_c = B_0 \cdot h_0 - m \cdot h_0^2 \quad (31)$$

$$F_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot g \cdot B_0 \cdot h_0^2 - \frac{2}{3} \cdot \rho_w \cdot g \cdot m \cdot h_0^3 \quad (32)$$

En voor kanaaldoorsnede 1 ($\eta = -Z$) geldt dan:

$$A'_c = B_0 \cdot (h_0 - Z) - m \cdot (h_0^2 - Z^2) - A_s \quad (33)$$

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot g \cdot B_0 \cdot (h_0 - Z)^2 + \rho_w \cdot g \cdot m \cdot (h_0^2 - Z^2) \cdot Z - \frac{2}{3} \cdot \rho_w \cdot g \cdot m \cdot (h_0^3 - Z^3) - \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot g \cdot b \cdot d^2 \quad (34)$$

Stuwkracht op boeg in doorsnede 2

Voor de hoogte waarover het water voor de boeg van het schip wordt opgestuwd geldt (zie figuur 3.11):

$$\eta_2 = C_D \cdot \frac{(V_s \pm U_0)^2}{2 \cdot g}$$

Hierin is C_D een weerstandscoefficient voor de stromingsdruk welke, uiteraard sterk afhankelijk van de vorm van de boeg. De wrijving langs het schip, welke ondergeschikt is aan de stuwdruk, is eenvoudigheidshalve in deze C_D -waarde meegenomen.

De op een prismatisch gevormde boeg van een schip werkende hydrostatische kracht F_2 wordt hiermee:

$$F_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot g \cdot b \cdot [C_D \cdot \frac{(V_s \pm U_o)^2}{2 \cdot g} + Z + d]^2$$

of bij benadering:

$$F_2 = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_w \cdot (V_s \pm U_o)^2 \cdot b \cdot (Z + d) + \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot g \cdot b \cdot (Z + d)^2 \quad (35)$$

Uit experimenten is voor de weerstandscoefficient C_D de volgende uitdrukking gevonden:

$$C_D = \gamma \cdot (d/h_o)^2 \quad (36)$$

Hierin is γ een vormcoefficient, waarvan de waarde voor een volprismatisch gevormde boeg gelijk is aan $\gamma = 1$. Voor konventionele binnenschepen is $\gamma = 0,8$ à $1,0$. Voor duwbakken met een schuin oplopende boegvorm loopt de γ -waarde naar nul.

Voor het **behoud van massa** ($m_o = m_1$) geldt bij relatieve beweging:

$$\rho_w \cdot A_c \cdot (V_s \pm U_o) \cdot dt = \rho_w \cdot A'_c \cdot (V_s + U) \cdot dt \quad (37)$$

En voor het **behoud van impuls** ($F \cdot dt = m \cdot dU$) geldt:

$$(F_o - F_1 - F_2) \cdot dt = \rho_w \cdot A_c \cdot (V_s \pm U_o) \cdot (U \mp U_o) \cdot dt \quad (38)$$

De volgende uitdrukkingen gelden voor stroomvoerende kanalen (zie figuur 3.10):

$$V_s \pm U_o = V'_s \quad \text{en} \quad V_s + U = V'_s + U'$$

en met vergelijking (31) wordt:

$$\bar{h} = \frac{A_c}{B_o} = h_o \cdot \left\{ 1 - \frac{m \cdot h_o}{B_o} \right\} \quad (39)$$

Vergelijkingen (37) en (38) kunnen nu als volgt worden geschreven:

$$(A_c - A'_c) \cdot V'_s = A'_c \cdot U' \quad (37a)$$

$$\frac{F_o - F_1 - F_2}{\rho_w \cdot g \cdot \bar{h} \cdot A_c} = \frac{V'_s \cdot U'}{g \cdot \bar{h}} = \left\{ \frac{A_c}{A'_c} - 1 \right\} \cdot \frac{V'^2_s}{g \bar{h}} \quad (38a)$$

Door invoering van de eerder gevonden uitdrukkingen voor F_o , F_1 , F_2 , A_c en A'_c in vergelijkingen (37a) en (38a) ontstaan de volgende dimensieloze relaties:

$$\frac{V'_s}{\sqrt{gh}} = \left[\frac{2 \cdot \left(\frac{Z}{\bar{h}}\right) \cdot \left(1 - \frac{A_s}{A_c}\right) - \left(\frac{Z}{\bar{h}}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{b}{B_o}\right) + \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{Z}{\bar{h}}\right)^3 \cdot \left(\frac{m \cdot \bar{h}}{B_o}\right)}{C_D \cdot \left(\frac{A_s}{A_c} + \frac{Z}{\bar{h}} \cdot \frac{b}{B_o}\right) + 2 \cdot \left(\frac{1}{1 - \left(\frac{Z}{\bar{h}}\right) + \left(\frac{m \cdot \bar{h}}{B_o}\right) \cdot \left(\frac{Z}{\bar{h}}\right)^2 - \frac{A_s}{A_c}} - 1\right)} \right]^{1/2} \quad (40)$$

$$\frac{U'}{\sqrt{gh}} = \left[\frac{1}{1 - \frac{Z}{\bar{h}} + \left(\frac{m \cdot \bar{h}}{B_o}\right) \cdot \left(\frac{Z}{\bar{h}}\right)^2 - \frac{A_s}{A_c}} - 1 \right] \cdot \frac{V'_s}{\sqrt{gh}} \quad (41)$$

met $\frac{V'_s}{\sqrt{gh}} = \frac{V_s \pm U_o}{\sqrt{gh}}$ en $\frac{U'}{\sqrt{gh}} = \frac{U \pm U_o}{\sqrt{gh}}$

Hierin zijn de parameters A_s/A_c , b/B_o , $m \cdot \bar{h}/B_o$ en $C_D = \gamma \cdot (d/h_o)^2$ voor een gegeven kanaalprofiel en schip bekend.

V'_s/\sqrt{gh} en U'/\sqrt{gh} zijn dus alleen afhankelijk van de parameter Z/\bar{h} .

De gegeven vaarsnelheid (V_s) en de gegeven stroomsnelheid (U_o) in het ongestoorde kanaal moeten dus eerst omgerekend worden naar een relatieve vaarsnelheid

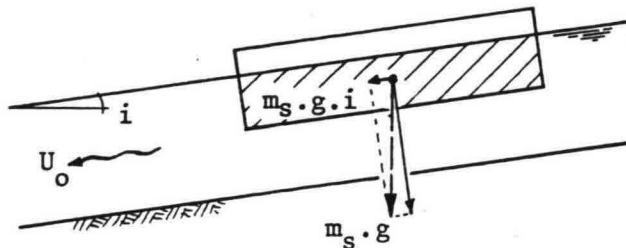
$$V'_s = V_s \pm U_o$$

waarvoor dan de relatieve retourstroomsnelheid (U') en de spiegeldaling (Z) kunnen worden gevonden met behulp van vergelijkingen (40) en (41). De werkelijk optredende retourstroom ten opzichte van de oevers wordt dan gevonden uit

$$U = U' \pm U_o$$

Voor scheepvaart op rivieren met een verhang i kan in de impulsvergelijking de kracht ten gevolge van de **vervalweerstand** (ontbondene van de zwaartekracht) worden meegenomen. De grootte van deze kracht is:

$$F_v = m_s \cdot g \cdot i = \rho_w \cdot \delta \cdot l \cdot b \cdot d \cdot g \cdot i$$



Figuur 3.12. Vervalweerstand op rivieren

De methode Sharp en Fenton [24] is te beschouwen als een bijzonder geval van het voorgaande. Hierbij wordt namelijk uitgegaan van een rechthoekig kanaalprofiel ($m = 0$) zonder stroomsnelheid ($U_o = 0$) en zonder opstuwing bij de boeg van het schip ($C_D = 0$). De uitdrukkingen (40) en (41) worden daarmee sterk vereenvoudigd:

$$\frac{V'_s}{\sqrt{gh}} = [2 \cdot (Z/\bar{h}) \cdot \{1 - (Z/\bar{h}) - A_s/A_c\} + (Z/\bar{h})^2 \cdot (1 + b/B_0)]^{1/2} * [2/\{1 - (Z/\bar{h}) - A_s/A_c\} - 2]^{-1/2} \quad (42)$$

en

$$\frac{U}{\sqrt{gh}} = [\{1 - Z/\bar{h} - A_s/A_c\}^{-1} - 1] \cdot \frac{V'_s}{\sqrt{gh}} \quad (43)$$

3.2.3. Scheepsweerstand en stuwdruk

De vaarsnelheid van een schip is sterk afhankelijk van de weerstand die het bij het varen ondervindt, en uiteraard van het geïnstalleerde motorvermogen in samenhang met de eigenschappen van de voortstuwer. De vaarsnelheid is belangrijk voor de reistijd van binnenschepen en de daarmee samenhangende vervoerskosten.

De weerstand en daarmee de vaarsnelheid van een schip wordt in sterke mate bepaald door de geometrie van het schip en de vaarweg en de daarmee direkt samenhangende, reeds eerder behandelde interactie tussen schip en vaarweg. Vooral bij het varen op in de breedte en/of diepte beperkte vaarwegen wordt deze weerstand voor een groot deel bepaald door de waterbeweging (retourstroom en spiegeldaling) rondom het schip en door de inzinking en de trim van het schip zelf. In de praktijk wordt de inzinking van het schip meestal gelijkgesteld aan de spiegeldaling en wordt de trim van het schip veelal verwaarloosd. Een groot aantal onderzoekers zoals Huuska [27] in relatie met Tuck [26], Barras [28], Soukhomel en Zass [29] hebben met behulp van min of meer theoretische en/of experimentele methoden getracht hiervoor uitdrukkingen te geven. Deze zijn echter sterk afhankelijk van de gekozen geometrie van het schip en de vaarweg, en daardoor veelal niet algemeen geldig.

Dand [30] en Führer and Römisch [31] hebben getracht methoden te vinden die aansluiten op de reeds eerder behandelde methode waarbij de retourstroom en spiegeldaling met behulp van behoud van energie zijn gevonden. Ook hiervoor gelden de beperkende omstandigheden.

De weerstand van het schip varend in **onbeperkt water** (U en Z zeer klein) en $U_0 = 0$ kan worden onderverdeeld in weerstandskomponenten, zoals door bijvoorbeeld Raven [32] is gedaan:

a. Wrijvingsweerstand

Deze wordt dan veroorzaakt door de schuifspanningen langs de scheepshuid en is evenredig met het oppervlak van het ondergedompelde gedeelte van de scheepsromp (A_{SO}) en met het kwadraat van de scheepssnelheid (V_s) volgens:

$$R_F = C_F \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot V_s^2 \cdot A_{SO} \quad (44)$$

Hierin is C_F een wrijvingscoëfficiënt, waarmee de ruwheid van het schip wordt meegenomen. In de literatuur worden voor nieuwe (vrij gladde) schepen voor C_F waarden tussen de 0,00025 à 0,0004 gevonden.

b. Drukweerstand

Deze wordt veroorzaakt door de verschillen in normaaldrukken tussen boeg en kiel van het schip en is bij benadering evenredig met het zogenaamde natte oppervlak van het grootspant (A_s) en het kwadraat van de scheepssnelheid (V_s) volgens:

$$R_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_W \cdot V_S^2 \cdot A_S \quad (45)$$

Een andere indeling wordt onder andere door Hughes [33] gemaakt. Hij onderscheidt drie componenten, waarvan de eerste de zogenaamde **viskeuze weerstand**. Hierin wordt de viskeuze drukweerstand samengevoegd met de wrijvingsweerstand:

$$R_V = (1 + k') \cdot C_F \cdot 2 \cdot \rho_W \cdot V_S^2 \cdot A_{SO} \quad (46)$$

Hierin is k' de zogenaamde vormfactor, welke sterk afhankelijk is van de scheepsvorm. Voor "slanke" zeeschepen (containerschepen e.d.) is $k' = 0,1$ en voor "volle" schepen (supertankers e.d.) ligt de k' -waarde tussen de 0,25 en 0,4. Voor de "konventionele" binnenschepen als de Spits, de Kempenaar en het Rijn-Hernekanaalschip ligt deze in de buurt van de 0,2 à 0,35.

Naast de viskeuze weerstand worden nog de **loslatingsdrukweerstand** (loslaten van de stroomlijnen bij het achterschip) en de **golfmakende weerstand** geïntroduceerd. Deze laatste is gelijk aan:

$$R_W = C_W \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_W \cdot V_S^2 \cdot A_S \quad (46a)$$

De C_W -waarde hangt vooral af van de **interferentie** van de nabij boeg en hek gevormde secundaire scheepsgolven, waarbij inzinking en trim eveneens een belangrijke rol spelen. De C_W -waarde is dan ook snelheidsafhankelijk, en neemt toe naarmate de vaarsnelheid groter wordt.

Deze onderverdeling is eigenlijk ingevoerd om modelonderzoek naar prototypemetingen te kunnen interpreteren.

Binnenschepen kunnen alleen op relatief onbeperkt water zodanig hoge snelheden bereiken dat de golfmakende weerstand interessant wordt. Pas boven een vaarsnelheid groter dan $0,18 \cdot \sqrt{g \cdot h_0}$ begint de golfweerstand enige invloed te krijgen ten opzichte van de andere weerstanden. De viskeuze weerstand blijkt dan ook bij varen op zogenaamd beperkt water maatgevend te zijn als bijdrage aan de totale weerstand.

Voor de weerstand van schepen varende op **beperkt water** spelen de retourstroom (U) en de spiegeldaling (Z) een toenemende rol, naarmate de beperking in breedte of diepte toeneemt.

De wrijvingsweerstand neemt hierdoor sterk toe. In de eerder genoemde vergelijking (44) kan dit worden meegenomen door (V_S) te vervangen door ($V_S + U$), zijnde de relatieve snelheid van het langs de scheepshuid stromende water.

Ook de drukweerstand neemt toe, aangezien door de veel grotere spiegeldaling van het schip op beperkt water de inzinking van het schip eveneens toeneemt. Dit geldt ook ten aanzien van de trim (achteroverhellen van het schip).

In een bijdrage van v.d. Kaa [34] is voor beperkt water een vereenvoudigde formule voor de weerstand van duweenheden afgeleid, uitgaande van de energiemethode Schijf (met $\alpha = 1$) voor wat betreft de gevonden waarden van U en Z . Uitgangspunt hierbij is dan dat de door de schroef toegevoerde energie geheel wordt benut om de druk- en wrijvingsweerstand te overwinnen, en dus **niet** wordt aangewend voor de opwekking van de hydraulische verschijnselen rondom het varende schip.

$$R_T = C_F \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot (V_S + U)^2 \cdot A_{SO} + \rho_w \cdot g \cdot A_S \cdot Z + C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot V_S^2 \cdot A_S \quad (47)$$

De waarde van C_F ligt hierbij in de orde van grootte van 0,0002. Voor de waarde van C_D geldt voor geladen duwstollen met Europa-II bakken bij een situatie met 1 à 2 bakken achter elkaar een waarde van circa 0,1. Bij een lange formatie van 3 bakken achter elkaar zijn de energieverliezen groter, waardoor de waarde circa 0,3 wordt. Bij prototypemetingen in het Hartelkanaal is voor ongeladen duwstollen in de formatie 2x2 gevonden dat $C_D = 1,5$. (Deze waarde is betrokken op de doorsnede A_S van de duwbakken.)

Door Graewe [35] wordt voor konventionele binnenschepen op beperkt water, en speciaal voor Rijn-Hernekanaalschepen, de zogenaamde "kleine formule van Gerbers" aanbevolen:

$$R_T = \rho_w \cdot g \cdot (C_1 \cdot A_{SO} + C_2 \cdot A_S) \cdot (V_S + U)^{2,25} \quad (48)$$

waarin R_T de weerstand is van een **gesleept** schip (in N) en

$$A_{SO} = 0,9 \cdot (b + 2 \cdot d)$$

met $C_1 = 0,00014$

en $C_2 = 0,0035$ voor geladen schepen, respektievelijk 0,0020 voor ongeladen schepen. Voor spitsen blijkt 0,0015 beter te voldoen.

Deze formule is slechts geldig bij niet te grote vaarsnelheid, en indien de ruimte onder het schip meer dan 1 m bedraagt.

Ook hier is, voor de bepaling van de waarde van de retourstroom (U), uitgegaan van de energiemethode Schijf met $\alpha = 1$.

Bij de impulsmethode van Bouwmeester wordt, in tegenstelling tot bij de energiemethode, reeds met krachten gewerkt. Hierdoor kan op eenvoudige wijze de schroefkracht worden bepaald uit het evenwicht van krachten welke op het schip zelf werken, namelijk door het verschil in hydrostatische druk tussen de boeg en het hek van het schip te nemen. Met de eerder gedane aanname, dat de wrijvingsweerstand verdisconteerd wordt in de C_D -waarde (zie vergelijking (35)) en dat de waterspiegeldaling (Z) nog aanwezig is bij het hek van het schip, wordt de benodigde stuwkracht voor een **duweenheid** in een stroomvoerend kanaal bij benadering:

$$F_S = \rho_w \cdot g \cdot \left[C_D \cdot \frac{(V_S + U_0)^2}{2 \cdot g} + Z \right] \cdot A_S \quad (49)$$

of in dimensieloze vorm:

$$\frac{F_S}{\rho_w \cdot g \cdot \bar{h} \cdot A_C} = \left[\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot (d/h_0)^2 \cdot \frac{(V_S + U_0)^2}{g \cdot \bar{h}} + Z/\bar{h} \right] \cdot A_S/A_C$$

Bij een **konventioneel schip** bevindt de schroef zich nog onder het achterschip, in tegenstelling tot bij een duweenheid, waarbij het voortstuwingsmiddel zich op enige afstand achter de bakken bevindt. Dit betekent dat bij een konventioneel schip geen spiegeldaling bij de achterstevan aanwezig is, waardoor voor de benodigde stuwkracht wordt gevonden:

$$F_S = \rho_w \cdot g \cdot b \cdot C_D \cdot \frac{(V_S + U_0)^2}{2 \cdot g} \cdot [Z + d] \quad (49a)$$

3.2.4. Vaarsnelheid in relatie tot het motorvermogen

Voor de stuwkracht welke door een scheepsschroef kan worden ontwikkeld gelden volgens Constock [36] de volgende relaties:

$$F_S = k_T \cdot \rho_w \cdot n_p^2 \cdot D_p^4 \quad (50)$$

$$F_S = \eta_o \cdot \eta_s \cdot \eta_R \cdot P_s / U_A \quad (51)$$

Hierin zijn k_T en η_o (dimensieloze) schroefcoëfficiënten, welke afhankelijk zijn van de schroefvorm en de relatieve intreesnelheid. Ze worden bepaald uit proeven met zogenaamde **vrijvarende** schepen. Hierbij geldt verder dat:

$U_A = (V_s + U) \cdot (1 - W')$ = intreesnelheid van het water in de schroefschijf

n_p = toerental van de schroef (omw/s)

D_p = schroefdiameter (m)

P_s = totaal motorvermogen op de as (W)

$\eta_s = 0,9 \text{ à } 1,0$ = rendementsverlies tussen motoras en schroef

$\eta_R = 1,0 \text{ à } 1,05$ = rendement tussen vrijvarende schroef en werkelijke schroefplaatsing achter het schip

$W' = 0,3 \text{ à } 0,5$ = dimensieloze reductieparameter in verband met wervel- en zoggebied op onbeperkt vaarwater.

Bij varen op onbeperkt water volgt uit de vergelijking tussen stuwkracht en weerstand (verg. (50) resp. (44) en (45)) het uit de zeevaart bekende praktisch lineaire verband tussen toerental (n_p) en vaarsnelheid (V_s). Bij het varen op beperkt water, speciaal bij hogere snelheden, gaat dit verband steeds minder op. Hiervoor blijkt toch nog een min of meer lineair verband te bestaan tussen het toerental (n_p) en de relatieve snelheid van het schip ten op zichte van het ernaast stromende water ($V_s + U$).

Volgens v.d. Kaa [34] geldt dan voor het verband tussen de weerstand (R_T) [volgens vergelijking (47)] en het motorvermogen [volgens uit de stuwkracht (F_S) volgens vergelijking (51)]:

$$R_T \cdot (V_s + U) = \frac{\eta_o \cdot \eta_s \cdot \eta_R}{(1 - W') \cdot (1 + a)} \cdot P_s \quad (52)$$

Hierin is de toegevoegde term $(1 + a)$ nodig om het verschil in weerstand tussen een gesleept schip en een zelfvarend schip in rekening te brengen. De waarde van η_o is bij benadering evenredig met $J = U_A / (n_p \cdot D_p)$. Dit hangt samen met het feit dat schroeven hierop worden ontworpen voor wat betreft het voor de praktijk toepasbare gebied. Toepassing binnen het gebied met te grote J -waarden zou η_o sterk doen afnemen, hetgeen niet wenselijk is. Omdat verder η_s , η_R en a voor een gegeven schip bij benadering ook konstant zijn, mag ook η_T voor het gehele werkingsgebied van de schroef ongeveer konstant worden verondersteld ($\eta_T = 0,7$). Algemeen geldt dan:

$$R_T \cdot (V_s + U) = \eta_T \cdot P_s \quad (52a)$$

Met vergelijking (47) geldt dan voor duwstellen op beperkt water:

$$\begin{aligned} & [C_F \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot (V_s + U)^2 \cdot A_{S0} + \rho_w \cdot g \cdot A_S \cdot Z + C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot V_s^2 \cdot A_S] \cdot (V_s + U) = \\ & = \eta_T \cdot P_s \end{aligned} \quad (53)$$

Voor konventionele binnenschepen op beperkt water geldt met toepassing van vergelijking (48) volgens Graewe [34]:

$$\rho_w \cdot g \cdot (C_1 \cdot A_{SO} + C_2 \cdot A_S) \cdot (V_S + U)^{2,25} \cdot V_S = \eta_T \cdot P_S \quad (54)$$

Vergelijking (53) is voor geladen duweenheden getoetst, waarbij uitgaande van een gegeven motorvermogen (P_S) de daarbij berekende vaarsnelheden (V_S) niet meer dan 10% afwijken van de gemeten vaarsnelheden. Voor ongeladen duweenheden is dit niet bekend.

Vergelijking (54) is getoetst aan een groot aantal praktijk- en modelmetingen voor Kempenaars en Rijn-Hernekanaalschepen, alsmede andere konventionele binnenschepen. Voor geladen schepen waren de afwijkingen 5 à 10%, terwijl deze voor ongeladen schepen veel groter bleken te zijn. Algemeen geldt verder dat indien de vaarwaterbreedte groter is dan 1,5 à 2 maal de scheepslengte, de afwijkingen veel groter worden.

Uitgaande van de impulsmethode met de daarbij behorende benodigde schroefkracht, gevonden in vergelijking (49) wordt het benodigde motorvermogen gelijk aan:

$$P_S = \frac{F_S \cdot (V_S + U_0)}{\eta_T'} \quad [W] \quad (55)$$

Hierin is η_T' een coëfficiënt voor het totale rendement van de voortstuwcr.

- Voor een **duweenhcd** blijkt uit een vergelijking met de energiemethode met $\eta_T = 0,7$ (zie paragraaf 3.2.6) dat ongeveer geldt $\eta_T' = 0,45$.
- Voor een **konventioneel schip** heeft Drost [84] uit een beperkt aantal waarnemingen op bestaande kanalen de volgende relatie gevonden:

$$\eta_T' = 0,067 \cdot d + 0,098 \cdot d^2 \cdot [1 - P_S/P_{S,max}]$$

Hierin is $P_{S,max}$ het geïnstalleerde motorvermogen.

Bij een bekend ingesteld vermogen (P_S) en bekende rendementen (η_T of η_T') kan nu langs iteratieve weg via de spiegeldaling (Z) en de retourstroom (U) de juiste vaarsnelheid van het schip worden gevonden. Dit laatste door middel van de vergelijkingen (14) en (15) indien wordt uitgegaan van de energiemethode, of door middel van de vergelijkingen (40) en (41) indien wordt uitgegaan van de impulsmethode.

Als beperking geldt hier uiteraard dat voor **onbeperkt vaarwater** de maximaal te bereiken zogenaamde "rompsnelheid" gelijk is aan

$$V_S = \sqrt{g \cdot l / (2 \cdot \pi)}$$

met l = lengte schip, wat gelijk wordt aan de golflengte van de transversale secundaire scheepsgolven L_t .

Voor **beperkt vaarwater** geldt dit slechts voor schepen met zeer korte lengte, maar ten aanzien van de eerder genoemde grenssnelheid geldt dat deze nooit kan worden overschreden, ook al zou men het motorvermogen onbeperkt laten toenemen.

Indien een schip **langs de oever** moet varen in verband met het ontmoeten of inhalen van een ander schip, dan zal de retourstroom tussen de dichtstbijzijnde oever en het schip gaan toenemen en daarmee de spiegeldaling en

inzinking van het schip. De vaarsnelheid zal hierdoor afnemen bij gelijkblijvend motorvermogen ten opzichte van een situatie waarbij het schip in de as van het kanaal vaart. Voor dergelijke, in de praktijk gebruikelijke, situaties blijkt de vaarsnelheidsreduktie maximaal 5 à 10% te zijn. Indien bij noodgevallen direkt langs de oever gevaren moet worden, dan kan deze snelheidsreduktie oplopen tot 15 à 20%.

Ook wanneer een schip **in te ondiep water** komt dan wordt de kielspeling (vooral bij grotere vaarsnelheid met de daarmee gepaard gaande grotere spiegeldaling en inzinking van het schip) echter zo klein, dat de grenslagen langs de scheepsbodem en de kanaalbodem elkaar gaan beïnvloeden. Met een door Schlichting [37] opgesteld diagram kan, uitgaande van de vaarsnelheid op onbeperkt water, een reductie in snelheid voor varen op ondiep water (bij gelijkblijvend motorvermogen) worden bepaald. Zulke situaties komen in de praktijk echter pas voor als de kielspeling minder dan 0,5 m wordt, hetgeen op de West-Europese vaarwegen alleen voorkomt op rivieren bij zeer laag water.

3.2.5. Toetsing van de ééndimensionale waterbewegingsmodellen

Het toepassen van de ééndimensionale modellen is in feite alleen maar geoorloofd voor schepen die in het midden van een vaarweg varen. Verder mag de breedte van een vaarweg (B_0) in principe niet veel groter zijn dan de lengte van het beschouwde schip (l). Zoals reeds eerder is opgemerkt mag de verhouding B_0/l zeker niet groter dan 1,5 zijn, wil het ééndimensionale karakter van de waterbeweging nog enigszins blijven opgaan.

Uitgaande van de verhouding tussen waterspiegelbreedte (B_0) en scheepsbreedte (b) blijkt, gezien het voorgaande en het gegeven dat voor binnenschepen globaal geldt dat $l/b = 8$, dat het toepassingsgebied voor deze verhouding ligt tussen $2 < B_0/b < 12$.

De toetsing van de methoden is gedaan aan de hand van zeer uitgebreide series proeven, welke zijn uitgevoerd voor een onderzoek naar inzinking en vertrimming van schepen [38], waarbij tevens de waterbeweging was meegenomen. Verder is gebruik gemaakt van systematisch uitgevoerde metingen door het Waterloopkundig Laboratorium, in het kader van onderzoek M1115 "Aantasting van dwarsprofiel in vaarwegen", zoals deze in verslag deel 4 van M 1115 [39] zijn weergegeven. Tenslotte is nog gebruik gemaakt van de in het Hartelkanaal uitgevoerde prototype-metingen uit het verslag deel 11^c van M 1115 [40].

Uit het onderzoek van Blaauw en van der Knaap [38] blijkt in zijn algemeenheid dat de impulsmethode Bouwmeester met de empirische coëfficiënt $C_D = \gamma \cdot (d/h_0)^2$, waarbij weliswaar de waarde $\gamma = 1$ is genomen, voor het gehele toepassingsgebied van B_0/b het beste te gebruiken is als het gaat om het bepalen van de **waterspiegeldaling en de retourstroom**.

De energiemethoden van Schijf e.a. blijken alleen te voldoen in het gebied $2 < b_0/b < 4,5$. Dit gebied geldt eveneens voor de impulsmethode van Sharp en Fenton.

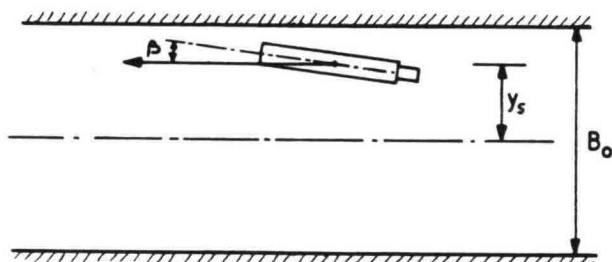
Voor de bepaling van de **inzinking en squat** (totale inzinking van het schip, inclusief de trim als gevolg van het varen) blijkt de theorie van Tuck [26] voor waarden van $B_0/b > 5$ het beste te voldoen.

Voor het bepalen van de **maximale squat** geeft Barras' werkwijze [28] voor waarden van $B_0/b > 5$ weer de beste resultaten.

Voor erg smalle kanalen ($B_0 < 4,5$) blijkt verder dat de **waterspiegeldaling en de inzinking** van het schip dezelfde grootte hebben, wat verklaard kan worden uit het feit dat hierbij het ééndimensionale karakter het meest wordt benaderd ($1/B_0 > 1,75$ voor schepen met $l/b = 8$).

Uit het onderzoek M 1115 [39 en 40] in het Waterloopkundig Laboratorium heeft een verdere toetsing plaats gevonden ten aanzien van **duweenheden**, waarbij zowel model- als prototypeproeven zijn gebruikt voor het toetsen van de methoden Schijf (met en zonder α), de methode Bouwmeester (met $\gamma = 1$) en de methode Sharp en Fenton. Voor duweenheden bleek de methode Sharp en Fenton (te vergelijken met de methode Bouwmeester met $\gamma = 0$) goed te voldoen voor de **spiegeldaling** over het gehele B_0/b -gebied. De energie-methoden bleken ook hier over het beperkte gebied $2 < B_0/b < 4,5$ goed toepasbaar.

Uit de proeven in het Hartelkanaal is voor duweenheden die **buiten de as van het kanaal** varen de hierdoor afwijkende waterbeweging, aan de zijde waar de afstand tussen wal en schip het kleinst is, direkt uit de meetresultaten afgeleid. Er bleek een sterke korrelatie tussen de afstand waarop uit de as werd gevaren (y_s) en de daarbij optredende retourstroom en spiegeldaling ten gevolge van onder andere de drifthoek (β) te bestaan (zie figuur 3.13).



Figuur 3.13. Duweenhed varend buiten de as van het kanaal

Hiervoor werd uitgaande van de methode Schijf (met $\alpha = 1$) het volgende verband gevonden voor de spiegeldaling:

$$\frac{Z_{\text{gemeten}}}{Z_{\text{berekend}}} = 1,46 \cdot \frac{y_s}{B_0} + 1,1 \quad (56)$$

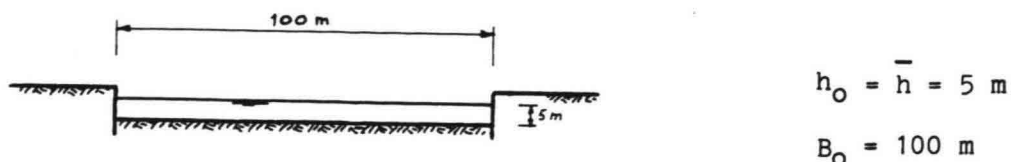
en voor de retourstroom:

$$\frac{U_{\text{gemeten}}}{U_{\text{berekend}}} = 0,82 \cdot \frac{y_s}{B_0} + 1,0 \quad (57)$$

3.2.6. Numerieke uitwerking van een voorbeeld

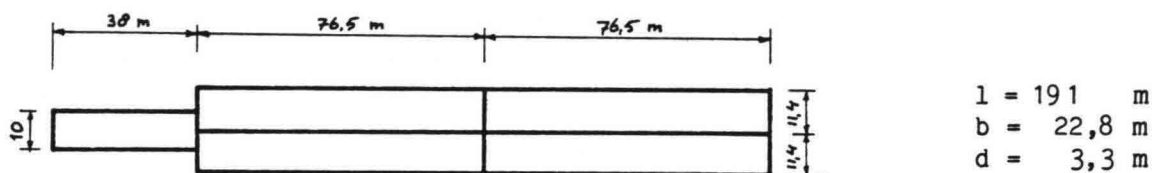
Voor dit voorbeeld wordt gebruik gemaakt van modelproeven, verricht door Bouwmeester [41]. Alle hierna genoemde gegevens en meetresultaten zijn daarbij reeds omgerekend van model naar prototype.

Als kanaalprofiel is een rechthoekige vorm gekozen om zoveel mogelijk het ééndimensionale stroombeeld te benaderen. Voor de afmetingen is uitgegaan van een in de praktijk aanwezig kanaalprofiel, namelijk het Amsterdam-Rijnkanaal, benoorden de Lek (zie figuur 3.14).



Figuur 3.14. Dwarsprofiel Amsterdam-Rijnkanaal

Voor het modelschip werd de grootste duweenheid genomen die in bovengenoemd kanaal mag varen, namelijk een vierbaks duweenheid (zie figuur 3.15). De vaarten werden uitgevoerd varend in de as van het kanaal (ook in model op eigen kracht, dus geen sleepproof).



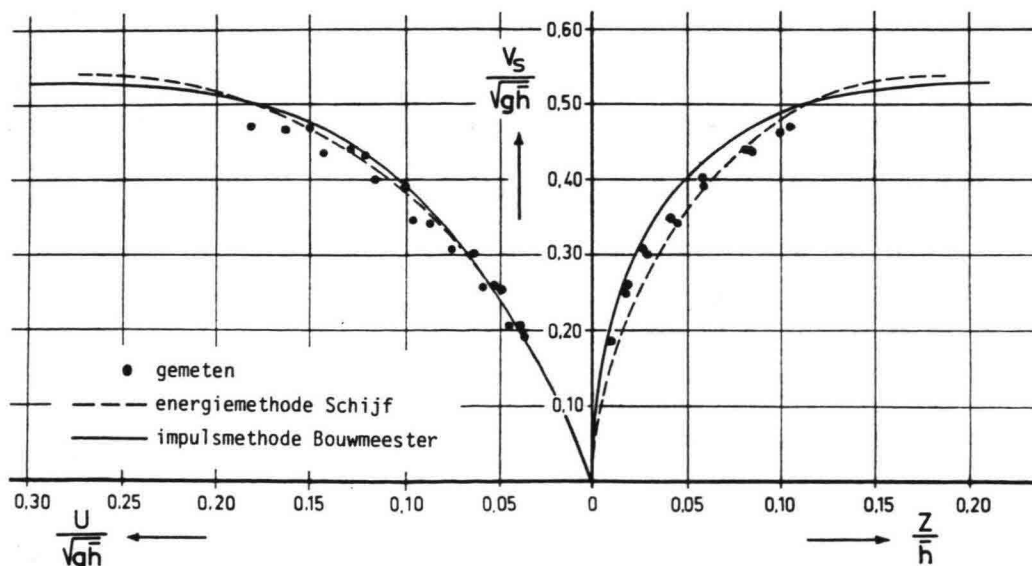
Figuur 3.15. Afmetingen van een vierbaks duweenheid

De meetresultaten worden in figuur 3.16 vergeleken met een tweetal één-dimensionale theorieën:

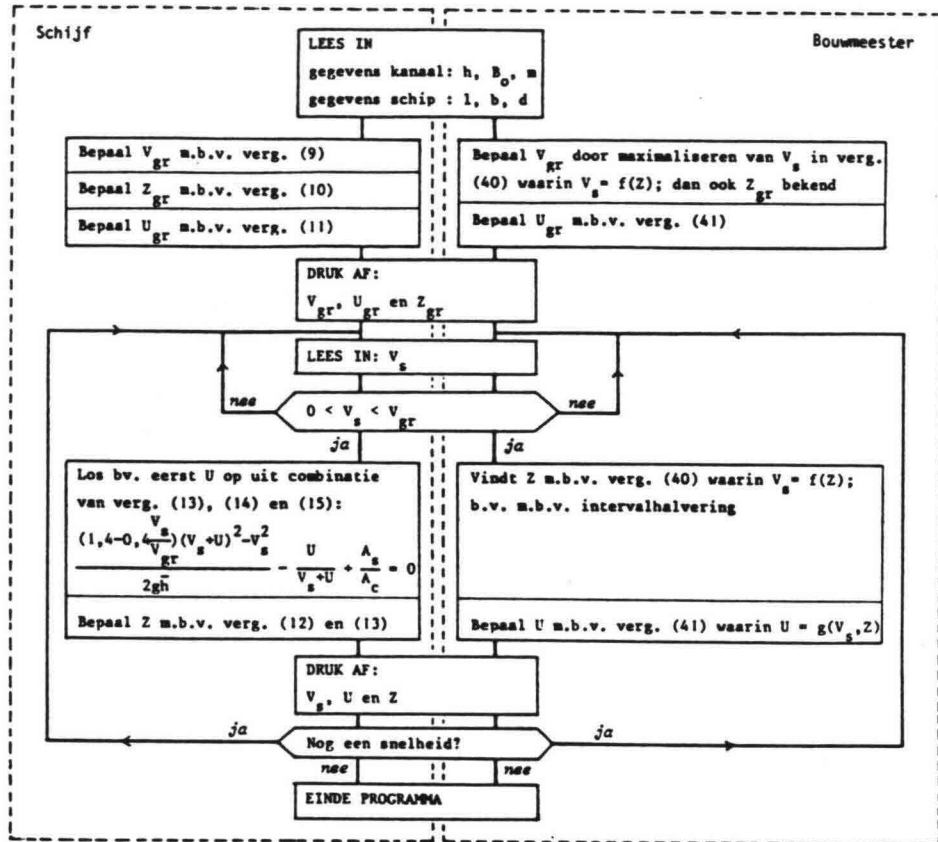
- De energiemethode Schijf (met α volgens vergelijking (13)).
- De impulsmethode Bouwmeester (met $\gamma = 0,1$).

De wijze van oplossen van de vergelijkingen staat schematisch weergegeven in het stroomschema in figuur 3.17.

Beide theorieën blijken redelijk overeen te stemmen met de meetresultaten, hetgeen ook verwacht kon worden op grond van de verhouding $B_0/b = 4,4$.



Figuur 3.16. Vergelijking berekende en gemeten waarden



Figuur 3.17. Stroomschema berekening

In tabel 3.1 zijn voor enkele vaarsnelheden de berekende retourstroom en spiegeldaling weergegeven. Bovendien zijn de resultaten volgend uit de methode Schijf (met $\alpha = 1$) opgenomen, omdat met behulp van de hierbij behorende waarden van V_s , U en Z het benodigd vermogen op de as (P_s) kan worden bepaald met vergelijking (53). Om enig inzicht te krijgen in het aandeel van de verschillende termen wordt deze vergelijking opgesplitst in

$$P_s = P_1 + P_2 + P_3 \quad \text{waarin:}$$

$$P_1 = \frac{C_F \cdot \rho_w \cdot A_{SO}}{2 \cdot \eta_T} \cdot (V_s + U)^3 \quad [W] \quad = \text{aandeel wrijving}$$

$$P_2 = \frac{\rho_w \cdot g \cdot A_s}{\eta_T} \cdot (V_s + U) \cdot Z \quad [W] \quad = \text{aandeel spiegeldaling}$$

$$P_3 = \frac{C_p \cdot \rho_w \cdot A_s}{2 \cdot \eta_T} \cdot (V_s + U) \cdot V_s^2 \quad [W] \quad = \text{aandeel stuwdruk}$$

Verder geldt

$$C_F = 0,0002$$

$$C_p = 0,1$$

$$A_{SO} = 0,9 \cdot l \cdot (b + 2 \cdot d) = 5054 \text{ m}^2$$

$$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\eta_T = 0,7$$

Tevens is in tabel 3.1 het berekende vermogen P_s volgens de impulsmethode Bouwmeester (vergelijkingen (49) en (55)) opgenomen. Een coëfficiënt $\eta'_T = 0,45$ (en $\gamma = 0,1$) blijkt hier vergelijkbare vermogens op te leveren als bij de hiervoor beschreven (energie)methode volgens vergelijking (55).

V_s (m/s)	Schijf $\alpha = 1$ en $\eta_T = 0,7$			Schijf met α		Bouwmeester $\gamma = 0,1$ en $\eta_T^c = 0,45$		
	U (m/s)	Z (m)	P_s (kW)	U (m/s)	Z (m)	U (m/s)	Z (m)	P_s (kW)
3,79 ¹⁾	1,92	0,93	7370	1,92	0,93	-	-	-
3,73 ²⁾	1,53	0,70	5357	1,60	0,75	2,08	1,04	6530
3,50	1,13	0,47	3310	1,24	0,56	1,24	0,55	3327
3,35 ³⁾	0,99	0,39	2626	1,10	0,48	1,06	0,45	2607
3,00	0,77	0,26	1615	0,86	0,37	0,80	0,30	1574
2,50	0,56	0,16	816	0,62	0,25	0,57	0,18	781
2,00	0,41	0,09	383	0,45	0,16	0,41	0,10	362
1,50	0,29	0,05	153	0,30	0,09	0,29	0,05	143
1,00	0,18	0,02	44	0,19	0,04	0,18	0,02	41
0,50	0,09	0,01	5	0,09	0,01	0,09	0,01	5

¹⁾ Grenssnelheid volgens Schijf

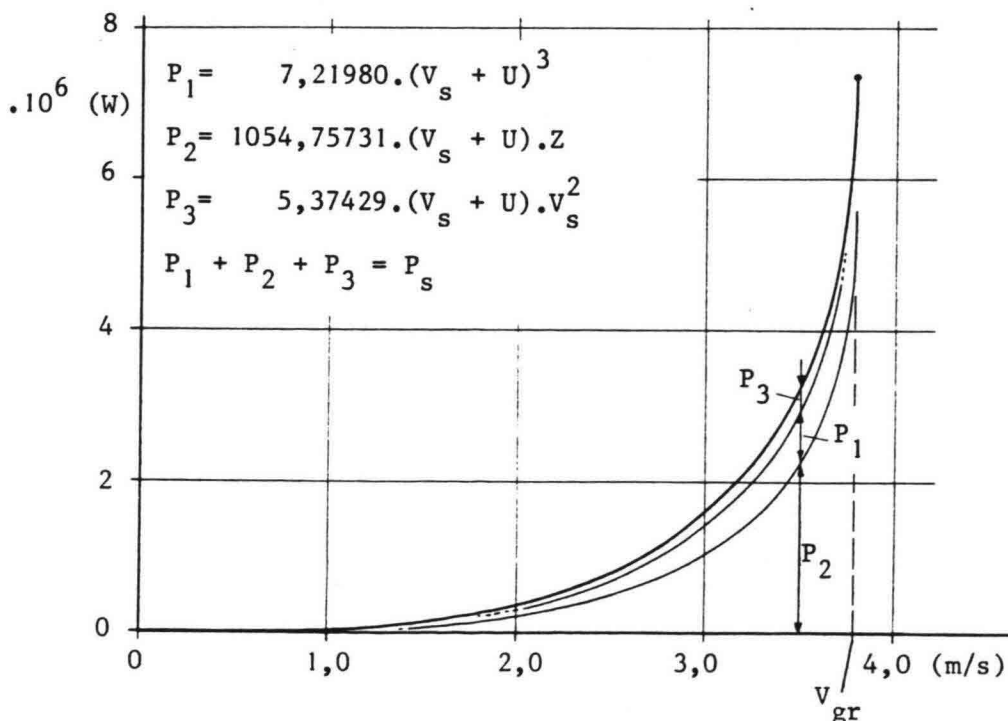
²⁾ Grenssnelheid volgens Bouwmeester

³⁾ Maximaal gemeten snelheid

Tabel 3.1. Berekende waarden

In figuur 3.18 is het benodigde vermogen (op bovenstaande manier uitge-splitst) uitgezet tegen de vaarsnelheid. Het blijkt dat:

- de spiegeldalingsterm de grootste invloed heeft op het vermogen, en
- het vermogen zeer progressief toeneemt in de buurt van de grenssnelheid; bij $0,9 \cdot V_{gr}$ is bijvoorbeeld nog maar 40% van het vermogen behorende bij V_{gr} nodig.



Figuur 3.18. Theoretisch benodigd vermogen

3.2.7. Hydraulische verschijnselen bij een inhaalmanoeuvre

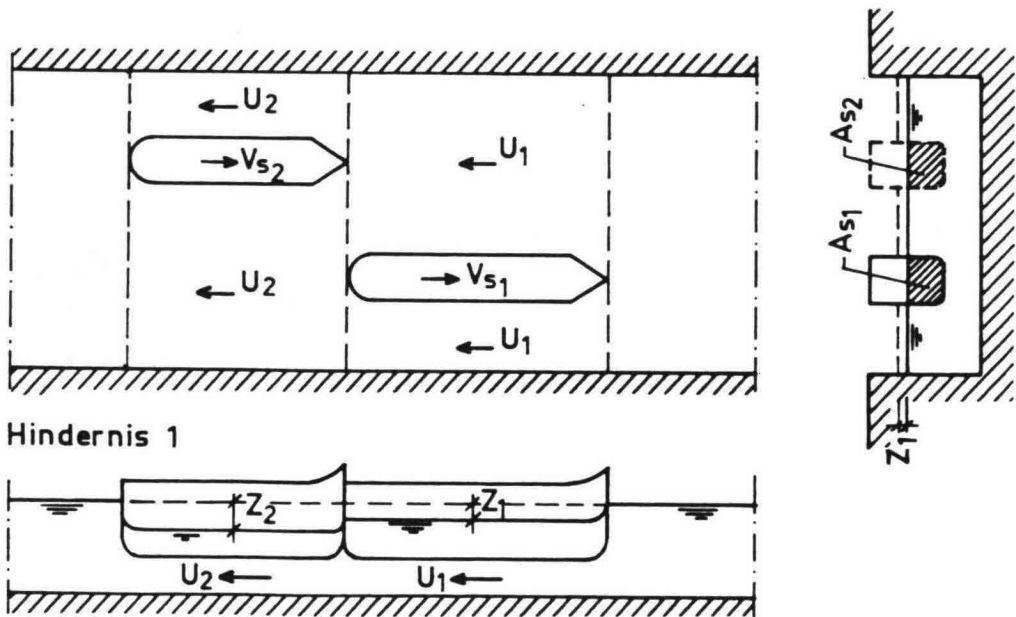
Bij een inhaalmanoeuvre moet het oplopende schip een tweetal hindernissen overwinnen.

De **eerste hindernis** begint direkt nadat het inhalen is begonnen en het oplopende schip (A_{s2}) vrij plotseling in een veel kleiner doorstromingsprofiel terecht komt, namelijk $\{A_c - A_{s1} - B_o \cdot Z_1\}$ ten gevolge van het opgelopen schip (A_{s1}) (zie figuur 3.19). Daarnaast krijgt de oploper ook nog te maken met de in zijn nadeel werkende retourstroom (U_1), welke wordt veroorzaakt door het opgelopen schip.

Dit heeft tot gevolg dat de grenssnelheid van de oploper (V_{gr2}) een stuk lager komt te liggen dan in het oorspronkelijke kanaalprofiel (A_c). Een voorwaarde voor een mogelijke inhaalmanoeuvre is dan ook dat deze grenssnelheid van de oploper in ieder geval hoger moet zijn dan de snelheid van het opgelopen schip:

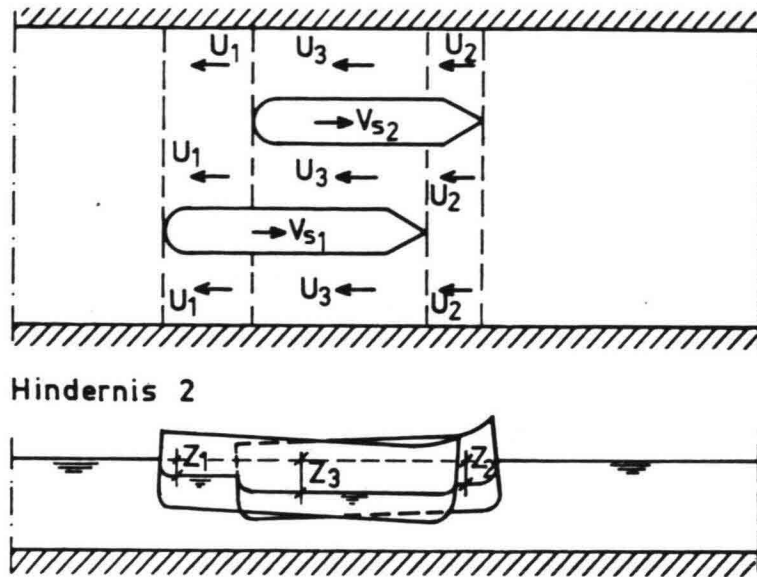
$$V_{gr2} > V_{s1}$$

In de praktijk blijkt deze voorwaarde meestal niet van belang, aangezien de snelheid van de opgelopen (V_{s1}) belangrijk zal gaan afnemen zodra de oploper (V_{s2}) naast hem begint te komen. Dit komt door de toenemende weerstand, veroorzaakt door de grotere gekombineerde retourstroom (U_3) en spiegeldaling (Z_3).



Figuur 3.19. Eerste hindernis bij een inhaalmanoeuvre

De **tweede hindernis** ontstaat indien de boeg van de oploper de boeg van de opgelopen net gepasseerd is (zie figuur 3.20).



Figuur 3.20. Tweede hindernis bij een inhaalmanoeuvre

De voorsteven van de oploper ligt dan in een door hemzelf veroorzaakt spiegeldalingsgebied (Z_2). Zijn achtersteven ligt echter in een spiegeldalingsgebied wat nog veroorzaakt wordt door beide schepen tezamen (Z_3). Aangezien $Z_3 \gg Z_2$ zal de oploper gaan vertrimmen, waarbij hij als het ware tegen een helling op moet varen. Indien de oploper op dat moment geen extra stuwkracht meer tot zijn beschikking heeft, dan zal zijn snelheid gaan afnemen.

Voor de opgelopene geldt het omgekeerde; zijn voorsteven bevindt zich namelijk in het gebied met een door beide schepen veroorzaakte waterspiegeldaling (Z_3), terwijl zijn achtersteven zich in een door hemzelf veroorzaakt gebied met waterspiegeldaling (Z_1) bevindt. Hierdoor ontstaat voor de opgelopene een meewerkende kracht, waardoor zijn snelheid zal toenemen.

Het gevolg is veelal dat de snelheden van beide schepen gelijk worden, waardoor de twee schepen als één systeem met een z.g. **groepssnelheid** door het kanaal gaan varen. Het snelste schip (de oploper) sleept het langzamer varende schip (de opgelopene) als het ware mee in hun gezamenlijke spiegeldalingkuil. Hierdoor mislukt de inhaalmanoeuvre. Zo'n inhaalmanoeuvre wordt pas mogelijk als de opgelopene tijdens de inhaalmanoeuvre gas terug neemt.

Wil men dit laatste (n.l. het gas terugnemen) voorkomen, dan dient het dwarsprofiel van het kanaal daarop gedimensioneerd en dientengevolge sterk vergroot te worden. De voorwaarde die zelfs dan moet gelden is, dat de oploper op het moment dat de tweede hindernis moet worden genomen voldoende stuwkracht kan ontwikkelen om zich tegen de helling omhoog te werken.

Uit modelproeven, M415 [11], blijkt dat de verhouding van de groepssnelheid tot de grenssnelheid van de groep, dit is de grenssnelheid bij $(A_{s1} + A_{s2})/A_c$, ongeveer het gemiddelde is van de verhoudingen van de oorspronkelijke snelheden van beide schepen tot hun oorspronkelijke grenssnelheden:

$$[V_s/V_{gr}]_{\text{groep}} = 0,5 \cdot [V_{s1}/V_{gr1} + V_{s2}/V_{gr2}] \quad (58)$$

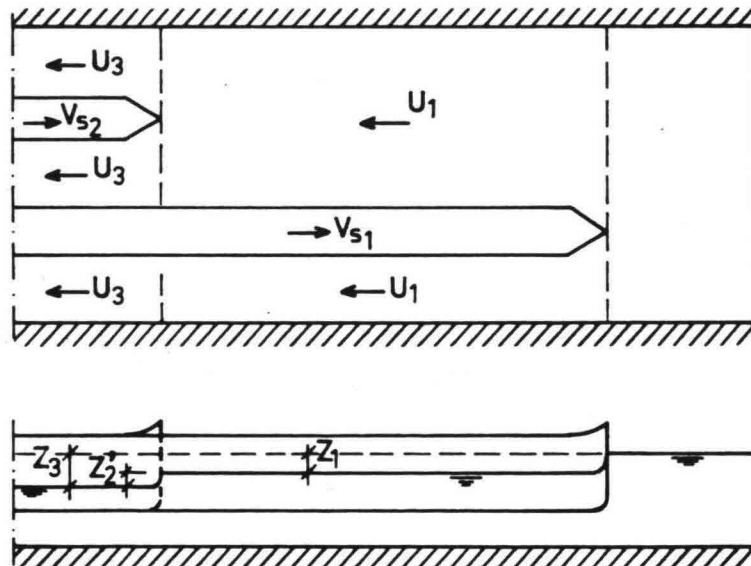
Met behulp van de relaties tussen vermogen en vaarsnelheid kan worden gezien bij welk snelheidsverschil ($V_{s2} - V_{s1}$) een inhaalmanoeuvre mogelijk is. Hierbij speelt de tijd en daarmee de afstand welke benodigd is voor een inhaalmanoeuvre, een belangrijke rol. Een inhaalmanoeuvre duurt minimaal, bij gelijkblijvende vaarsnelheden:

$$t_i = (l_1 + l_2)/(V_{s2} - V_{s1}) \quad (59)$$

Om bij een geschematiseerde inhaalmanoeuvre de hydraulische verschijnselen te berekenen wordt hier uitgegaan van de ééndimensionale energiemethode van Schijf met $\alpha = 1$ voor rechthoekige kanalen. Om dit probleem te kunnen oplossen wordt het opgelopen schip als zijnde zeer lang verondersteld (zie figuur 3.21).

Er treden nu twee discontinuïteiten op:

- a. De overgang van de ongestoorde waterspiegel naar een spiegeldaling (Z_1) ten gevolge van het opgelopen schip.
- b. De overgang van de verlaging (Z_1) naar de spiegeldaling (Z_3) ten gevolge van zowel het oplopende als het opgelopen schip.



Figuur 3.21. Definitieschets inhaalmanoeuvre

Om de **eerste overgang** te bepalen wordt het assenkruis op het opgelopen schip (A_{s1}) genomen, waarbij de vergelijkingen (4a) en (5a) gelden:

$$Z_1 = \frac{(V_{s1} + U_1)^2}{2.g} - \frac{V_{s1}^2}{2.g} \quad (60)$$

en

$$V_s.A_c = (V_{s1} + U_1).(A_c - A_{s1} - B_0.Z_1) \quad (61)$$

Om de **tweede overgang** te bepalen wordt het assenkruis op het oplopende schip (A_{s2}) genomen. Met de aanname van een lang opgelopen schip ontstaat er een permanente stroming (U_1) voor het schip in het verkleinde dwarsprofiel ($A_c - A_{s1} - B_o \cdot Z_1$), waarvoor dan geldt:

$$Z_2' = Z_3 - Z_1 = \frac{(V_{s2} + U_3)^2}{2 \cdot g} - \frac{(V_{s2} + U_1)^2}{2 \cdot g} \quad (62)$$

en

$$\begin{aligned} (V_{s2} + U_1) \cdot (A_c - A_{s1} - B_o \cdot Z_1) &= \\ &= (V_{s2} + U_3) \cdot (A_c - A_{s1} - A_{s2} - B_o \cdot Z_3) \end{aligned} \quad (63)$$

Bovenstaande benadering levert aldus vier vergelijkingen met vier onbekenden, namelijk U_1 , U_3 , Z_1 en Z_3 , zodat het geheel is op te lossen voor een bestaande situatie waarbij A_{s1} , A_{s2} , A_c , B_o gegeven zijn, en V_{s1} en V_{s2} als bekend worden verondersteld.

De oploper kan echter niet sneller dan zijn grenssnelheid in het beperkte profiel varen. Hiervoor geldt volgens vergelijking (9), met inachtnaam van de invloed van de bekende retourstroom (U_1) en spiegel daling (Z_1) als gevolg van het met snelheid V_{s1} varende opgelopen schip:

$$1 - \left[\frac{A_{s1}}{A_c} + \frac{A_{s2}}{A_c} + \frac{Z_1}{h} \right] + \frac{1}{2} \cdot Fr_2^2 - \frac{3}{2} \cdot \left\{ Fr_2 \cdot \left[1 - \frac{A_{s1}}{A_c} - \frac{Z_1}{h} \right] \right\}^{2/3} = 0 \quad (64)$$

Hierin is $Fr_2 = (V_{gr2} + U_1) / \sqrt{gh}$

Om inhalen mogelijk te maken moet uiteraard gelden dat: $V_{gr2} > V_{s2} > V_{s1}$ waarbij een minimum snelheidsverschil van 5 km/h tijdens de passage noodzakelijk wordt geacht om de inhaalmanoeuvre tot een succes te maken.

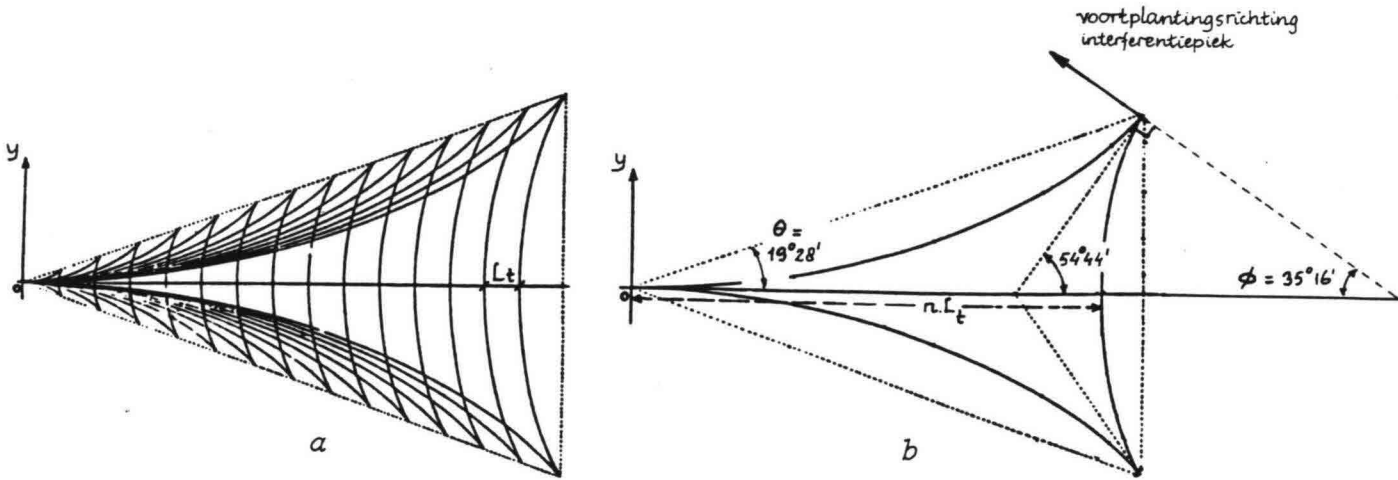
3.3. Secundaire waterbeweging

Bij het varen van een schip op een vaarweg wordt er bij het bereiken van een bepaalde snelheid een **golfstelsel** opgewekt. De energie, die voortdurend aan dit stelsel moet worden toegevoegd, wordt ontleend aan een gedeelte van het motorvermogen. Dit komt dan tot uiting in de reeds eerder door de scheepsbouwkundige ingenieurs geïntroduceerde **golfmakende weerstand**.

In het algemeen geldt voor golfopwekking, dat bij een relatieve snelheid van het schip ten opzichte van het omringende water beneden de waarde van 0,233 m/s er als gevolg van de oppervlaktetensioning praktisch geen golven zullen optreden. Pas boven deze snelheidsgrens ontstaan bij kleine golflengte ($< 1,7$ cm) de verwaarloosbare **kapillaire golven**, terwijl bij toenemende golflengte de zogenaamde **zwaartekrachtsgolven** gaan optreden welke van belang zijn voor de scheepvaart.

Kelvin [42, 43 en 44] was de eerste die zich reeds in de vorige eeuw rekenschap gaf over de wijze waarop deze golven worden gevormd. In eerste instantie vatte hij een schip, varende met konstante snelheid, op als een geïsoleerd drukpunt dat zich met konstante snelheid langs de oppervlakte van diep water beweegt en als gevolg daarvan een golfstelsel uitzendt. Hij toonde daarbij aan dat dit stelsel aanleiding geeft tot twee stelsels van

golven, namelijk een stelsel **divergerende golven**, die wijder worden aan beide zijden van de as van de vaarrichting naarmate deze verder achter het drukpunt zijn gelegen, en een stelsel **transversale golven**, welke achter het drukpunt ontstaan (zie figuur 3.22 a).



Figuur 3.22. Transversale en divergerende golven

De opzet van Kelvin is later door vele auteurs beschreven en uitgebreid, zoals door onder andere Ursell [45], Johnson [46], Sorensen [47 en 48] en Lamb [49].

Het verloop van de golfkamlijnen (zie figuur 3.22 b) kan volgens Kelvin in poolcoördinaten (r, θ) worden uitgedrukt volgens:

$$r^4 - L^2 \cdot r^2 \cdot (1 + 18 \cdot \sin^2 \theta - 27 \cdot \sin^4 \theta) + 16 \cdot L^4 \cdot \sin^2 \theta = 0 \quad (65)$$

De golfkamlijnen in figuur 3.22 a kunnen worden weergegeven door de vergelijkingen:

$$y = \frac{n \cdot \pi \cdot V_p^2}{2 \cdot g} \cdot (\sin \theta + \sin 3\theta) \quad (66)$$

en

$$x = \frac{n \cdot \pi \cdot V_p^2}{2 \cdot g} \cdot (5 \cdot \cos \theta - \cos 3\theta) \quad (67)$$

met $n = 1, 2, 3 \dots$ = het nummer van de beschouwde golfkam

V_p = de snelheid waarmee het drukpunt zich verplaatst

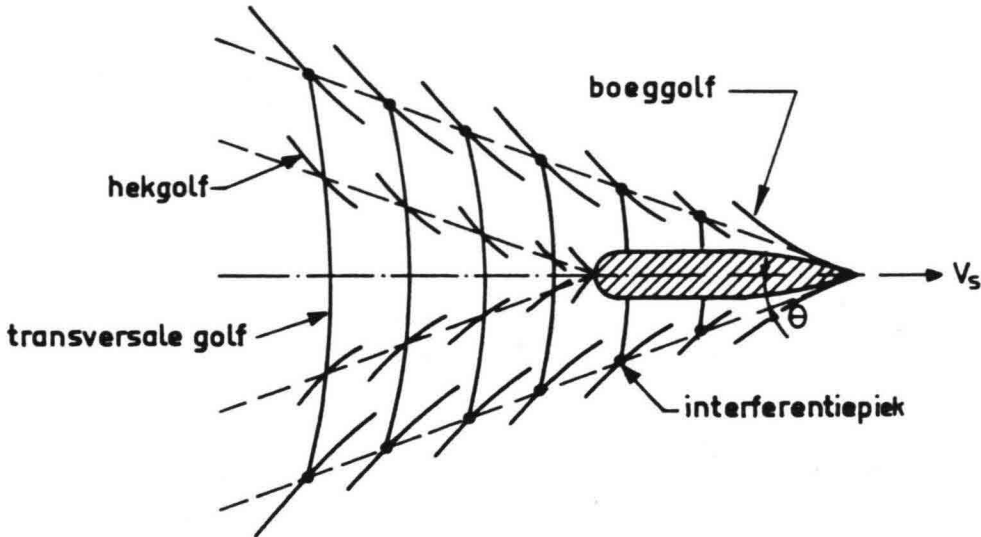
θ = de hoek tussen de x-as en het beschouwde punt t.o.v. het drukpunt

L = de golflengte tussen twee transversale golven op de x-as

De golfkamlijnen van de divergerende en die van de transversale golven vormen op de plaats van ontmoeting de zogenaamde **interferentiepieken**. Dit zijn verschijnselen die optreden op punten waar twee of meer golven gelijktijdig inwerken. De hoogte van de interferentiepiek wordt gevormd door de som van de hoogten van de afzonderlijke golven.

Op diep water en voor een geïsoleerd drukpunt liggen deze pieken op een lijn die een hoek $\theta = 19^\circ 28'$ maakt met de x-as ($\sin 19^\circ 28' = 1/3$). De Kelvin-theorie geeft geen informatie over de golven die buiten deze lijn liggen.

Een varend schip op diep water is op te vatten als een groot aantal van bovengenoemde drukpunten. Hierdoor ontstaat er rondom een varend schip een golfpatroon, zoals in figuur 3.23 is weergegeven.



Figuur 3.23. Golfpatroon rondom een varend schip

Opvallend is hierbij de overeenkomst met Kelvin's theorie. Er ontstaan ten gevolge van diskontinuiteiten als het ware twee systemen, namelijk één bij de boeg en één bij het hek van het schip. De hoek θ blijkt uit waarnemingen bij schepen meestal iets kleiner te zijn dan de eerder genoemde $19^{\circ}28'$, namelijk variërend tussen 10° en $19^{\circ}28'$. Verder zijn de transversale golven meestal pas achter het schip goed waarneembaar, aangezien buiten de lijnen die onder een hoek θ lopen er geen verstoringen optreden.

De uit de lineaire golftheorie voor **diep water** (geen invloed ten gevolge van de diepte) bekende formule voor de zwaartekrachtsgolven geeft een verband tussen de golflengte (L) en de voortplantingssnelheid (c):

$$c = \sqrt{g \cdot L / (2 \cdot \pi)} \quad \text{of} \quad L = c^2 \cdot 2 \cdot \pi / g \quad (68)$$

Uit de vergelijkingen (66) en (67) volgt voor $\theta = 0$:

$$y = 0 \quad \text{en} \quad x = n \cdot L = n \cdot V_s^2 \cdot 2 \cdot \pi / g$$

$$\text{dus:} \quad V_s = \sqrt{g \cdot L / (2 \cdot \pi)} \quad (68a)$$

Voor het drukpunt ($V_p = V_s$) uit figuur 3.22 blijkt volgens vergelijking (68a) eenzelfde relatie te gelden als voor diepwatergolven. De golflengte bij de scheepsgolven wordt echter geheel bepaald door de opgelegde voortplantingssnelheid, welke gelijk is aan de vaarsnelheid van het schip (V_s).

Nu is volgens Havelock [50] de golflengte van de transversale scheepsgolven te schrijven als:

$$L_t = \frac{2 \cdot \pi}{g} \cdot V_s^2 \cdot \sec^2 \theta \quad (69)$$

Met vergelijking (68) en (69) kan nu een relatie tussen de voortplantings-snelheid van de transversale golven (c_t) en de vaarsnelheid (V_s) worden gevonden:

$$c_t = V_s \cdot \sec \theta \quad (70)$$

Bekend is verder dat de groepssnelheid van golven in relatie tot de individuele golfsnelheid (c) niet alleen afhankelijk is van de golflengte (L), maar tevens van de waterdiepte (h_0) volgens de vergelijking:

$$c_{\text{groep}} = \frac{c}{2} \cdot \left[\frac{4 \cdot \pi \cdot h_0 / L}{\sinh\{4 \cdot \pi \cdot h_0 / L\}} + 1 \right] \quad (71)$$

Voor **diep water** (d.w.z. voor $h_0 \gg L$) geldt dan dat: $c_{\text{groep}} = c/2$. De transversale golven zullen zich dan ook, vanaf de verstoring, met de helft van de verstoringssnelheid naar achteren toe uitbreiden.

Wanneer de waterdiepte kleiner wordt dan de halve golflengte ($h_0/L < 0,5$), gaan de golven "de bodem voelen". De voortplantingssnelheid wordt dan afhankelijk van zowel de golflengte als de waterdiepte, en wel als volgt:

$$c' = \sqrt{g \cdot L / (2 \cdot \pi) \cdot \tanh\{2 \cdot \pi \cdot h_0 / L\}} \quad (72)$$

Eliminatie van L uit vergelijkingen (68) en (72) levert hiermee een verhouding op tussen golfsnelheden op beperkte en onbeperkte waterdiepte:

$$c'/c = \sqrt{\tanh\{g \cdot h_0 / c^2\}}$$

of, met de scheepssnelheid ($V_s = c$):

$$V_s'/V_s = \sqrt{\tanh\{g \cdot h_0 / V_s^2\}} \quad (73)$$

Deze snelheidscorrectie, veroorzaakt door het "voelen van de bodem", leidt tot een verhoging van de wrijvingsweerstand. Volgens vele onderzoekers, zoals Johnson [46] en Sorensen [47 en 48], treedt er pas een merkbare invloed op bij:

$$\tanh\{g \cdot h_0 / V_s^2\} < 0,95$$

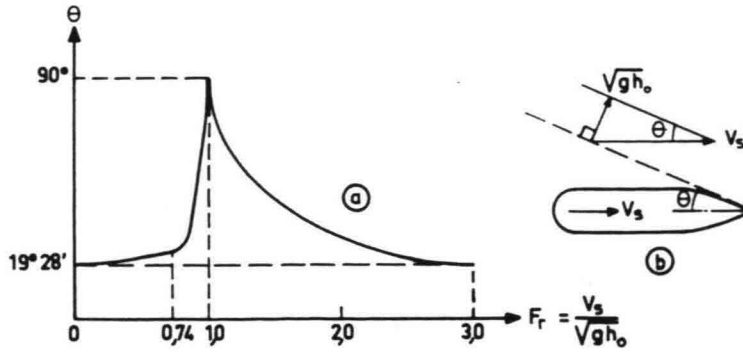
Betrokken op het Froudegetal (met $Fr = V_s / \sqrt{g \cdot h_0}$) geldt dus dat voor waarden van **$Fr < 0,74$** er, **ten aanzien van de scheepsgolven**, praktisch gesproken kan worden van diep water omstandigheden op water met beperkte diepte.

Indien deze waarde groter wordt, dan zal de hoek θ zeer sterk gaan toenemen tot de waarde $Fr = 1$ voor een hoek $\theta = 90^\circ$. Daarbij zullen de transversale en divergerende golven gaan samenvallen. Er ontstaat als het ware een lopende schokgolf, analoog aan de geluidsbarrière bij vliegtuigen vliëgend met een snelheid van Mach = 1.

Bij het nog verder opvoeren van de vaarsnelheid zal de hoek θ echter weer gaan afnemen, zoals in figuur 3.24 a is weergegeven. Dit laatste is voor de praktijk echter niet van belang, aangezien dit alleen bij sleeptoeven in het model kan worden bereikt.

Boven $Fr = 1$ geldt dan voor de hoek θ volgens Kelvin (figuur 3.24 b):

$$\sin \theta = \sqrt{g \cdot h_0} / V_s \quad (74)$$



Figuur 3.24. Invloed van de waterdiepte op de hoek θ

Wanneer tenslotte ook nog de breedte van het vaarwater beperkt wordt, dan zullen hierdoor naast en/of achter het schip extra interferenties op gaan treden. Dit is onder andere afhankelijk van de vaarsnelheid (V_s), de verhouding tussen vaarwegbreedte en scheeps lengte (B_0/l) en het al of niet excentrisch varen ten opzichte van de as van het beperkte vaarwater. Deze extra interferenties ontstaan door het geheel of gedeeltelijk terugkaatsen van de divergerende boeggolven op de oevers. Speciaal bij verticale damwandkonstrukties, waarbij praktisch volledige terugkaatsing optreedt, ontstaat er zodoende een zeer woelig vaarwater.

De snelheid van de divergerende golven is gelijk aan $V_s \cdot \cos \phi$, waarin ϕ de hoek is tussen de x-as en de richting waarin deze golf zich voortplant. Daarmee wordt de golflengte van de divergerende golven gelijk aan:

$$L_d = \frac{2 \cdot \pi}{g} \cdot V_s^2 \cdot \cos^2 \phi \quad (75)$$

Het verband tussen de golflengten van de transversale en de divergerende golven is dan:

$$L_d = L_t \cdot \cos^2 \phi \quad (76)$$

Voor de hoogte van de scheepsgolven zelf zijn, gezien het complexe karakter ervan, geen exacte formules te ontwikkelen. Wel zijn er vele proeven gedaan op ondiep water. Hierbij wordt dan onderscheid gemaakt tussen de hoogten van:

- a. Interferentiepieken
- b. Transversale golven.

3.3.1. Golfhoogte van de interferentiepieken

De voortplantingsrichting van de interferentiepieken voor een geïsoleerd drukpunt maakt een hoek ϕ van $54^{\circ}44'$ met de normaal op het talud of een hoek van $35^{\circ}16' = (90^{\circ} - 19^{\circ}28')/2$ (zie figuur 3.22 b) met de vaarrichting van het schip, zodat voor de interferentiepiek ($\cos 35^{\circ}16' = 0,82$) volgens vergelijking (75) geldt:

$$L_i = 0,67 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{g} \cdot V_s^2 \quad (77)$$

De voortplantingssnelheid van de interferentiepiek wordt dan:

$$c_i = V_s \cdot \cos \phi = 0,82 \cdot V_s \quad (78)$$

De golfhoogte van interferentiepieken (H_i) blijkt onder andere afhankelijk te zijn van de scheepssnelheid (V_s), de waterdiepte (h_0), de afstand tot de zijkant van het schip (y') en de vorm van het schip zelf (uitgedrukt in een coëfficiënt α_i). Door Gates en Herlich [51] is een verband opgesteld voor de golfhoogte van interferentiepieken, welke uitgedrukt in dimensie-loze grootheden als volgt kan worden geschreven:

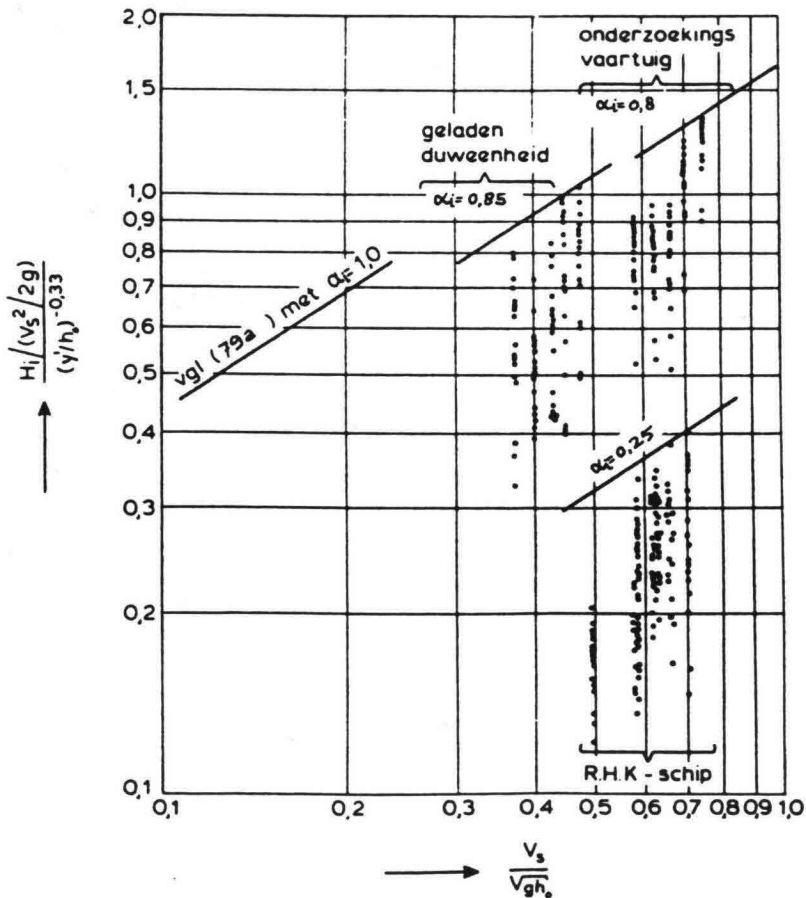
$$H_i/h_0 = \alpha_i \cdot [y'/h_0]^{-0,33} \cdot V_s/\sqrt{g \cdot h_0}]^{2,67} \quad (79)$$

Vele onderzoekers hebben bevestigd dat de exponent van 0,33, waarmee de hoogte van scheepsgolven afneemt als functie van de afstand y' , goed voldoet. Dit geldt in mindere mate voor de exponent 2,67. Das [52] vindt hiervoor uit proeven met Froudegetallen tussen 0,27 en 0,64 een waarde van 2,8, terwijl Sorensen [53] voor Froudegetallen tussen 0,53 en 0,85 zelfs een waarde van 3,4 heeft gevonden.

De golfhoogte H_i in verhouding tot de waterdiepte kan ook worden geschreven in verhouding tot de snelheidshoogte, namelijk:

$$H_i/\{V_s^2/2g\} = 2 \cdot \alpha_i \cdot (y'/h_0)^{-1/3} \cdot (V_s/\sqrt{g \cdot h_0})^{2/3} \quad (79a)$$

Uit recent onderzoek uitgevoerd in het Waterloopkundig Laboratorium [40] blijkt dat met behulp van vergelijking (79) of (79a) een goede voorspelling mogelijk is voor de maximaal optredende hoogte van de interferentie-golven, ondanks het feit dat er sprake is van een zeer grote spreiding (zie figuur 3.25).



Figuur 3.25. Optredende hoogten van interferentiegolven

Voor deze maximale golfhoogten werd voor de α_i -coëfficiënt gevonden:

- $\alpha_i = 0,85$ voor **geladen** duweenheden
- $\alpha_i = 0,80$ voor een onderzoekingsvaartuig
- $\alpha_i = 0,25$ voor een **ongeladen** Rijn-Hernekanaalschip.

Uit prototype-proeven werd verder gevonden:

- $\alpha_i = 0,35$ voor **ongeladen** duweenheden
- $\alpha_i = 0,35$ voor sleepboten.

Bij zowel model- als prototype-proeven bleek er verder sprake van goede overeenstemming met de in vergelijking (77) gevonden golflengte (L_i) en met de in vergelijking (78) bepaalde voortplantingssnelheid (c_i).

3.3.2. Golfhoogte van de transversale golven

De voortplantingsrichting en golflengte van de transversale golven volgen uit de vergelijkingen (69) en (70), waarbij de waarde van de hoek θ voor schepen tussen 10 en $19^\circ 28'$ kan variëren, zodat de golflengte van de transversale golven theoretisch tussen de volgende grenzen uitkomt:

$$1,03 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{g} \cdot V_s^2 < L_t < 1,125 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{g} \cdot V_s^2 \quad (80)$$

Uit prototype-proeven blijkt dat de waarde van $1,125$ voor **ongeladen** vierbaks duweenheden en sleepboten goed overeenkomt. Voor **geladen** vierbaks, respektievelijk zesbaks duweenheden treden duidelijk grotere golflengten op (circa 15% respektievelijk 25%).

De hoogte van de transversale golven (H_t) blijkt, op min of meer analoge wijze als voor de golfhoogte van interferentiepieken, als volgt te beschrijven:

$$H_t/h_0 = \alpha_t \cdot (x'/h_0)^{-0,5} \cdot (V_s/\sqrt{g \cdot h_0})^3 \quad (81)$$

Hierin is x' de afstand achter het schip, waarvoor geldt dat de golfhoogte over de golfkam praktisch gelijk blijft. De golfhoogte achter het schip is afhankelijk van de positie van het schip in de vaarweg, hetgeen bij proeven op het Hartelkanaal is bevestigd.

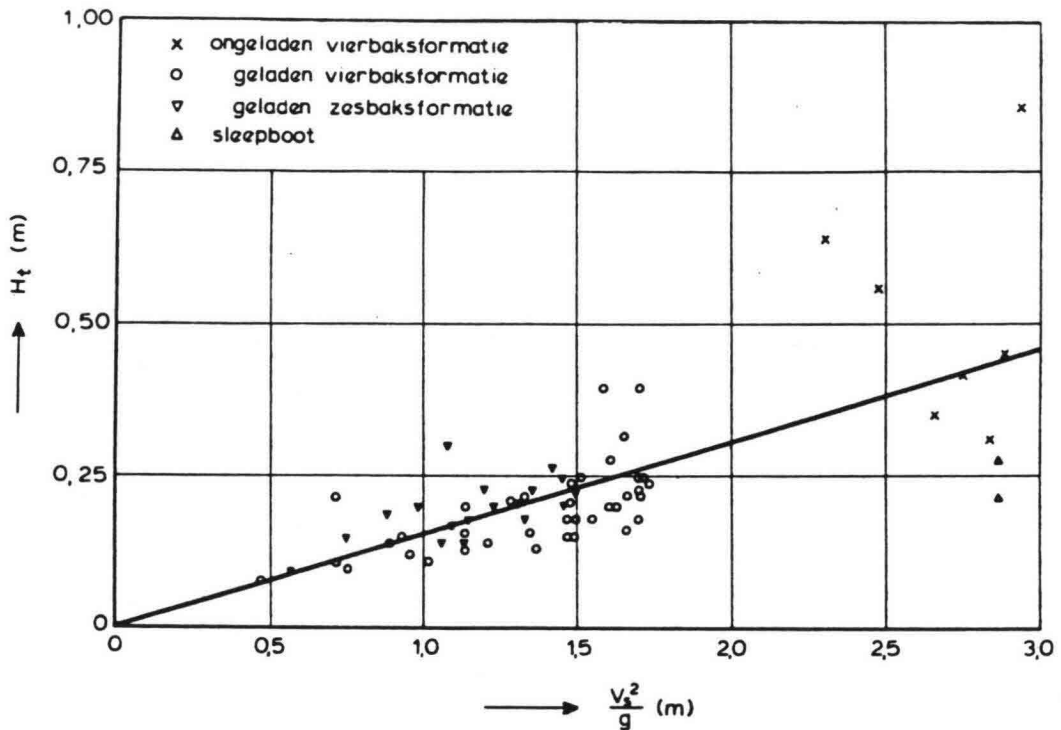
Indien de golfhoogte nabij de oevers van belang is, bijvoorbeeld bij de dimensionering van de oeverbescherming, dan blijkt dat bij vaart in de as van de vaarweg het te beschouwen gebied achter het schip bepaald wordt door:

$$x' > 0,5 \cdot B_0 \cdot \tan 19^\circ 28'$$

Dit is de afstand waarop de transversale golven de oever pas bereiken nadat de interferentiepieken net zijn gepasseerd. In dit gebied treedt een zeer gekompliceerd samengesteld golfpatroon op door interferentie van transversale golven met geheel of gedeeltelijk gereflekteerde interferentiepieken. Hiervoor blijkt geen logisch verband met de afstand x' te bepalen.

Op grond van prototypemetingen kan wel een verband worden aangetoond tussen de golfhoogte H_t en de scheepssnelheid V_s , zoals in figuur 3.26 is weergegeven. Er geldt namelijk:

$$H_t = \gamma_t \cdot V_s^2/g \quad (82)$$



Figuur 3.26. Hoogten van transversale golven

Als gemiddelde van alle vaarten werd een waarde $\gamma_t = 0,154$ gevonden.

Onderscheid hierin kan worden gemaakt met:

- $\gamma_t = 0,145$ voor een geladen vierbaksformatie
- $\gamma_t = 0,170$ voor een geladen zesbaksformatie
- $\gamma_t = 0,195$ voor een ongeladen vierbaksformatie
- $\gamma_t = 0,085$ voor een sleepboot.

Door Balanin en Bykov [17] is voor een bepaald trapeziumvormig kanaalprofiel een verband gevonden voor golfhogten direct achter het schip, dat echter niet als algemeen geldend mag worden aangenomen:

$$H_t = 2,5 \cdot V_s^2 / 2g \cdot [1 - \{1 - 1/\sqrt{4,2 + A_C/A_S}\} \cdot \{1 - A_S/A_C\}^2] \quad (83)$$

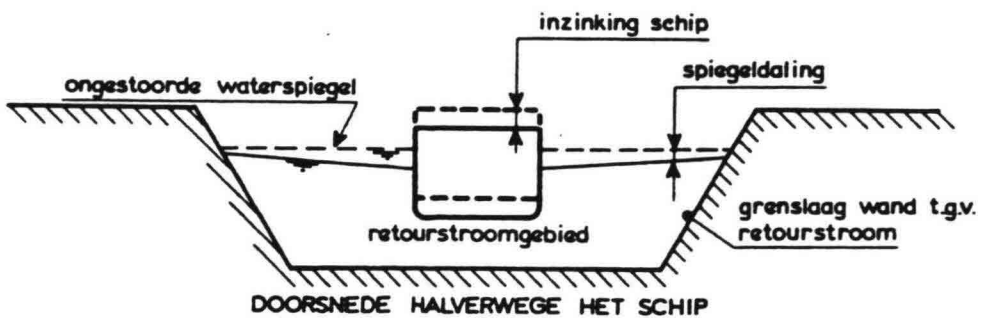
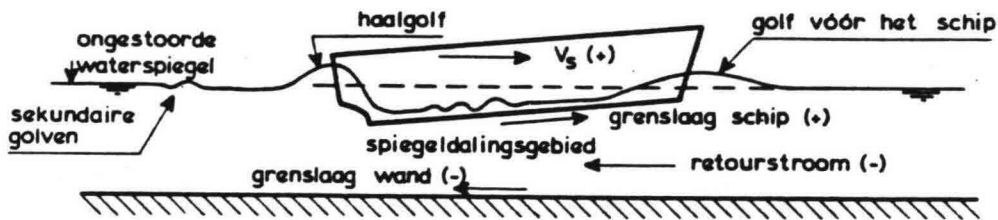
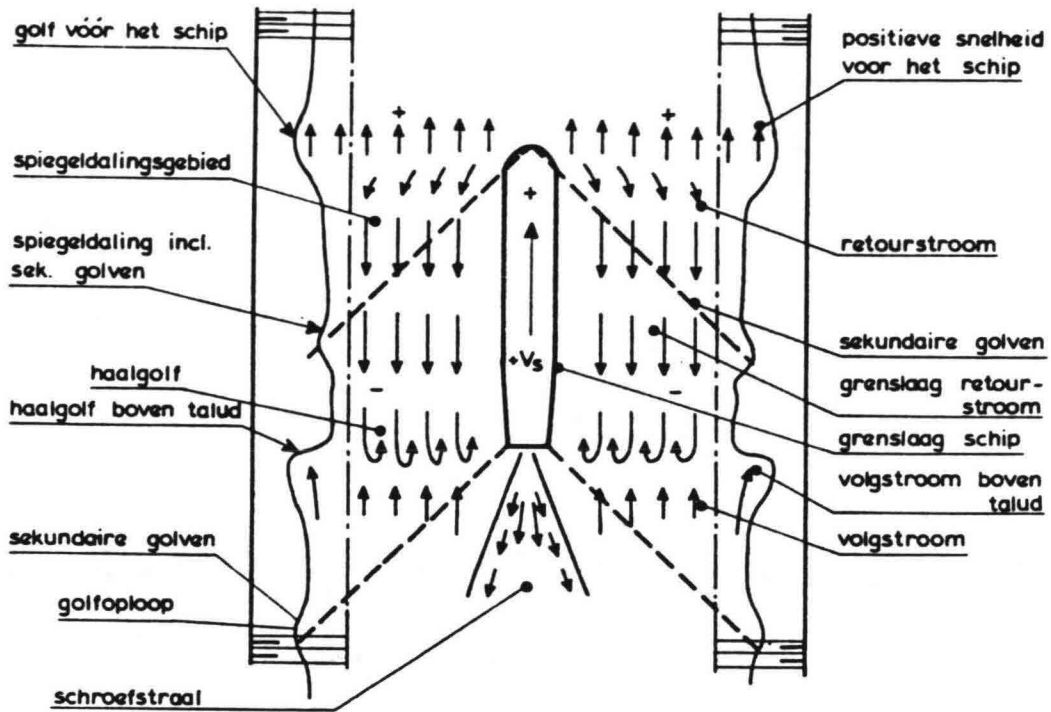
Voor de golven nabij de oever werd hierbij gevonden:

$$H'_t = \frac{2 + \sqrt{B_0/1}}{1 + \sqrt{B_0/1}} \cdot H_t \quad (84)$$

3.4. Overige hydraulische verschijnselen

In het voorgaande zijn de primaire en secundaire waterbeweging behandeld, waarbij de primaire waterbeweging werd beschreven als bestaande uit een spiegeldalingsgebied over de breedte van de vaarweg met een bijbehorende retourstroom rondom het schip. In figuur 3.27 zien we echter dat er door de waterspiegelverdringing bij de boeg direkt voor het schip uit een **front- of boeggolf** ontstaat, terwijl er ten gevolge van de aanvulling van het spiegeldalingsgebied bij het hek van het schip (plaatselijk beïnvloed door de aanzuiging door de schroeven), een **haal**golf optreedt.

Beide veroorzaken stroomsnelheden, waarvan de stroomrichting dezelfde is als de vaarrichting van het schip zelf, in het gebied vóór en direct achter het schip. De stroomsnelheid verder achter het schip, dus achter de haalgolf, wordt voornamelijk veroorzaakt door het naast het schip terugstromende schroefwater, en staat bekend als de **volgstroom**.

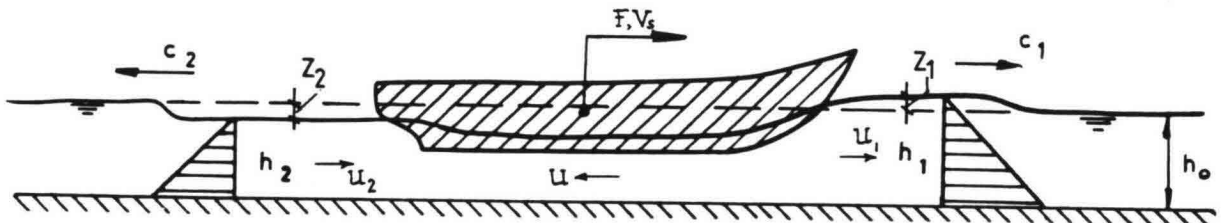


Figuur 3.27. Overzicht van de waterbeweging rondom een schip in een kanaal

In extreme situaties, zoals bij grote vaarsnelheden en bij zeer geringe speling tussen de bodem van het schip en de kanaalbodem: $h_0/d < 1,2$ ontstaat er een zeer sterke volgstream achter het schip. De maximale volgstreamsnelheid wordt in deze situatie zelfs groter dan de maximale retourstreamsnelheden onder het schip, zoals uit onderzoek van Schüle [54] is gebleken.

Beide effecten zijn, zoals eerder behandeld, bij de impulsmethode Bouwmeester reeds indirect naar voren gekomen (zie figuur 3.12). Bij de boeg is een stuwdruk ten gevolge van de boeggolf ingevoerd, en bij duweenheden is verder nog aangenomen dat direkt achter het schip nog de waterspiegel-daling (Z) ten gevolge van de schroefaanzuiging aanwezig is. Dit komt in vergelijking (49) tot uitdrukking in de benodigde stuwdruk.

Indien er op een schip een **uitwendige kracht** (F) wordt uitgeoefend (sleepschip of door luchtschroef voortbewogen schip), dan ontstaat er een voor het schip vooruitlopende positieve translatiegolf, en een naar achteren lopende negatieve translatiegolf achter het schip (zie figuur 3.28).



Figuur 3.28. Translatiegolven, veroorzaakt door een uitwendige kracht

Theoretisch kan worden afgeleid dat de voortplantingssnelheden van deze translatiegolven gelijk zijn aan:

$$c_1 = \sqrt{g \cdot h_0} \cdot [1 + 0,75 \cdot Z_1/h_0] \quad (85)$$

$$c_2 = \sqrt{g \cdot h_0} \cdot [1 - 0,75 \cdot Z_2/h_0] \quad (86)$$

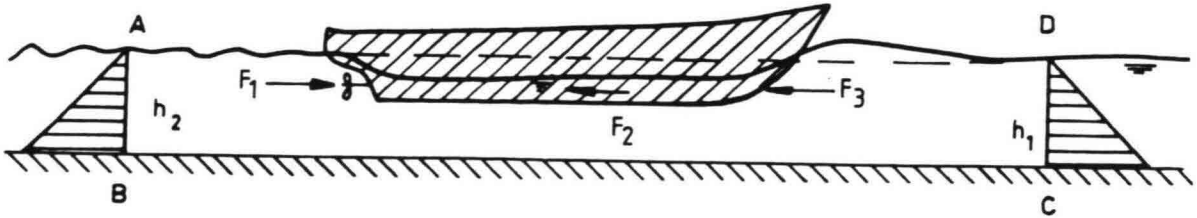
De daarbij behorende stroomsnelheden U_1 en U_2 volgen uit de continuïteitsbeschouwing:

$$U_1 = c_1 \cdot Z_1 / \{h_0 + Z_1\} \quad (87)$$

$$U_2 = c_2 \cdot Z_2 / \{h_0 - Z_2\} \quad (88)$$

De waarden van Z_1 en Z_2 worden bepaald door de verhouding A_s/A_c , de sleepkracht F en daarmee met de snelheid van het schip zelf (V_s).

Bij een zelfvaarder, waarbij de voortstuwung door een schroef wordt geleverd, is er sprake van een **inwendig krachtenspel**. Indien een motorschip met eenparige snelheid door een kanaal vaart, dan ontstaat er namelijk een evenwicht tussen de hoeveelheden door de schroef toegevoerde energie en de energieverliezen (zie figuur 3.29).



Figuur 3.29. Krachtenspel op een zelfvarend schip

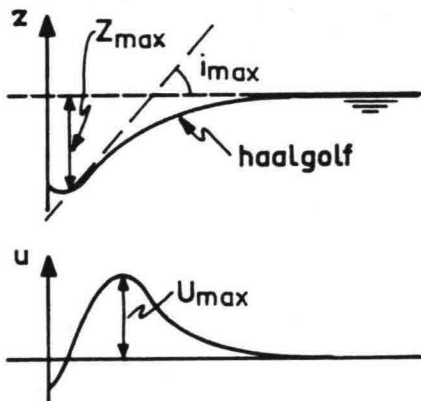
In principe geldt dat op de moot water ABCD een resulterende kracht gelijk aan nul moet werken, zodat $h_1 = h_2 = h_0$.

Zoals reeds eerder naar voren is gebracht, blijkt er in de praktijk direct vóór het schip een soort translatiegolf (boeg golf) te ontstaan, die echter dezelfde snelheid heeft als het schip zelf. De hiermee gepaard gaande energie zou bij het varen met een eenparige snelheid dan gelijk moeten zijn aan de achter het schip nog aanwezige energie in de vorm van volgstroom, schroefstroom en opgewekte scheepsgolven.

Op rivieren blijkt het volgens de riviermeesters mogelijk om de komst van een groot schip, vanwege zijn opgewekte echte translatiegolf vóór het schip, reeds van tevoren te voorspellen aan de hand van peilschaalwaarnemingen. Dit is echter een gevolg van de vervalweerstand ten gevolge van de ontbondene van de zwaartekracht, zijnde een uitwendige kracht.

De haalgolf, zoals reeds eerder genoemd, wordt gedefinieerd als zijnde de achterzijde van de door een varend schip opgewekte "spiegeldalingskuil". De hierdoor ontstane aanval speciaal op de taludverdediging bij een trapeziumvormig kanaalprofiel kan bepalend zijn voor de stabiliteit, zeker indien direct langs de oever gevaren wordt. In dit verband wordt voor een uitgebreide behandeling verwezen naar het KIVI-symposium [55]. Hier worden kortheidshalve de resultaten gegeven.

In figuur 3.30 zijn in een principeschets de karakteristieke grootheden van een haalgolf boven een talud weergegeven:



Z_{max} = maximale spiegeldaling aan het begin van de haalgolf

i_{max} = maximaal verhang bij het front van de haalgolf

U_{max} = maximale stroomsnelheid in de haalgolf

Figuur 3.30. Haalgolf

Op grond van prototypeproeven in het Hartelkanaal werd voor duweenheden, varend in formaties 2x2, 2x3 en 3x2, met snelheden $V_s > 0,8 \cdot V_{gr}$, een relatie afgeleid voor de **maximaal optredende spiegeldaling** (Z_{max}) boven het talud:

$$\frac{Z_{\max}}{h_0} = 2360 \cdot \left\{ \frac{A_s}{A_c} \right\}^{2,42} \cdot \left\{ \frac{V_s}{\sqrt{g \cdot h_0}} \right\}^6 \cdot [0,67 + y/60] \quad \text{als } V_s > 0,8 \cdot V_{gr} \quad (89)$$

Hierin geeft de parameter y (in m) de positie van de formatie ten opzichte van de kanaalas weer.

Deze waarden van Z_{\max} bleken 1,5 à 2 maal de grootte van de berekende gemiddelde spiegeldaling (volgens Schijf met $\alpha = 1$) aan de zijde van het schip met de "kortste afstand" tot de oever.

Uit modelproeven was reeds eerder gebleken dat voor snelheden $V_s > 0,85 \cdot V_{gr}$ een meer dan 2 maal grotere waarde ten opzichte van de gemiddelde waterspiegeldaling volgens de theorie van Schijf met $\alpha = 1$ werd gevonden.

Voor de **steilheid** van de haalgolf werd, zowel uit model- als uit prototype-proeven, voor duweenheden varende in de formatie 1x2 langs de teen van het talud voor het maximale optredende verhang (i_{\max}) gevonden:

$$i_{\max} = [Z_{\max}/\{5,1 - 0,158 \cdot y\}]^2 \quad \text{indien } i_{\max} < 0,1 \text{ à } 0,15 \quad (90)$$

Een vrij goede afschatting voor de **maximaal optredende stroomsnelheid** in de haalgolf bij een duweenheid, varende langs de teen van het talud, kan worden verkregen met:

$$U_{\max} = 0,1 \text{ à } 0,2 \cdot V_s \quad \text{voor } Z_{\max}/(\Delta \cdot D_{50}) < 1,2 \quad (91a)$$

of

$$U_{\max} = \{1 - \Delta \cdot D_{50}/Z_{\max}\} \cdot V_s \quad \text{voor } Z_{\max}/(\Delta \cdot D_{50}) > 1,2 \quad (91b)$$

Hierin is $\Delta = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w = 1,65$

Hierbij kon geen directe afhankelijkheid van de parameter y worden vastgesteld; indirect is deze reeds in de waarde van Z_{\max} verwerkt.

Wel is gekonstateerd dat bij passage op grotere afstand van de oever de volgens vergelijkingen (91a) en (91b) geschatte waarden van U_{\max} te groot zijn.

Tenslotte is uit modelonderzoek nog gevonden dat voor de oeververdedigingskonstruktie, opgebouwd uit loskorrelig materiaal, pas bij waarden van $Z_{\max}/(\Delta \cdot D_{50}) \geq 2,3$ een begin van transport optreedt. Volgens vergelijking (91b) zou dan voor de stroomsnelheid gelden dat pas transport van materiaal, gekenmerkt door $\Delta \cdot D_{50}$, gaat plaatsvinden als $U_{\max} > 0,57 \cdot V_s$. Hieruit blijkt wel dat grote voorzichtigheid is geboden bij het zondermeer toepassen van deze vergelijkingen op andere dan de gemeten situaties, gezien de schijnbare onafhankelijkheid met de materiaaleigenschappen!

Ter afsluiting dient nog iets gezegd te worden over de grootte van de **schroefstraal** achter de scheepsschroeven, aangezien deze, speciaal bij het doorlopen van bochten en nabij los- en wachtplaatsen, maatgevend kunnen worden voor de oeververdediging.

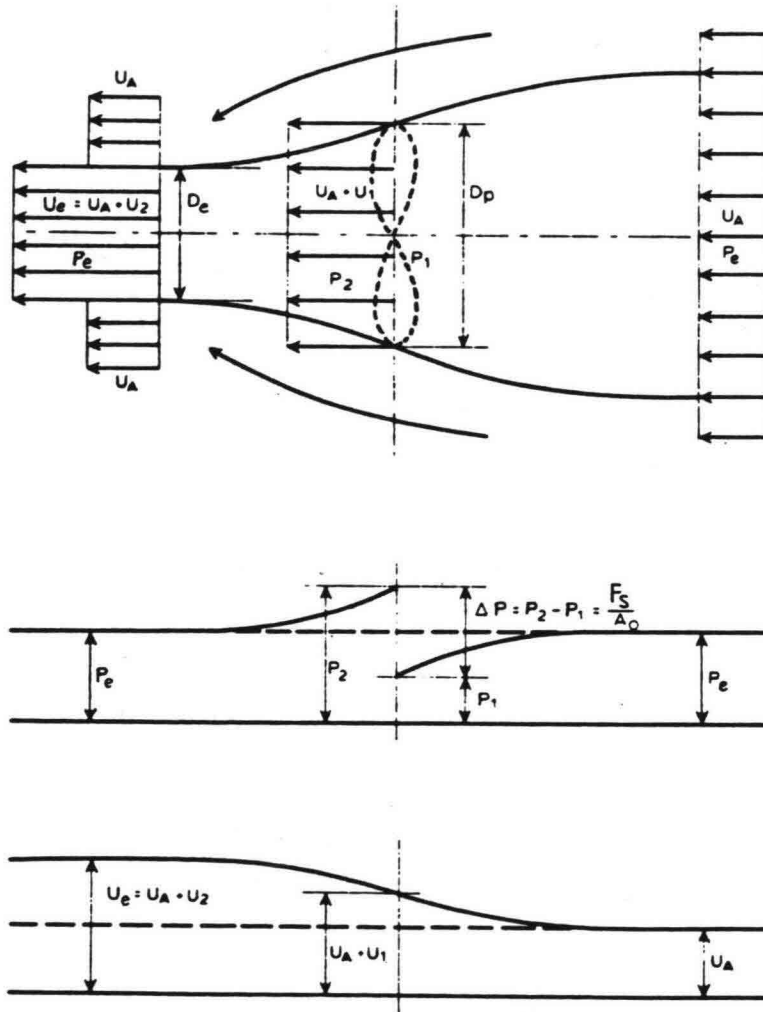
Allereerst zijn er proeven gedaan met enkelvoudige schroeven achter stil- liggende schepen zonder roerinvloeden (zie Blaauw en van der Kaa [56]). Uitgaande van de diffusietheorie voor een homogene cirkelvormige straal werd voor afstanden $X_s > X' = 2,8 \cdot D_e$ achter de schroef gevonden:

$$U_{x,r} = [X_S/X']^{-1} \cdot \exp\{-15,4 \cdot (r/x)^2\} \cdot U_e \quad (92)$$

Hierin is U_e de uitstroomsnelheid achter de schroef, welke met de impuls-
theorie kan worden bepaald, en D_e de effectieve schroefdiameter, waarvoor
geldt:

- $D_e = 0,71 \cdot D_p$ voor een enkele schroef zonder straalbuis
- $D_e = 0,85 \cdot D_p$ voor een schroef geplaatst in een schroeftunnel
- $D_e = 1,00 \cdot D_p$ voor een schroefstraalbuis.

In figuur 3.31 zijn de druk- en snelheidsveranderingen in het schroefvlak
(ter plaatse van de schroefdiameter D_p) schematisch weergegeven.



Figuur 3.31. Schroefstraal

Aannemende dat de stuwkracht van de schroef gelijk is aan de impulsveran-
dering van het water ten gevolge van de schroef, wordt dan gevonden:

$$F_S = \rho_w \cdot u \cdot A \cdot \Delta u = \rho_w \cdot (U_A + U_1) \cdot \pi/4 \cdot D_p^2 \cdot U_2 \quad (93)$$

Met de reeds eerder in vergelijking (50) gevonden uitdrukking voor de stuwkracht van de schroef geeft dit, met $U_1 = 0,5 \cdot U_2$:

$$(U_e + U_A) \cdot (U_e - U_A) = U_e^2 \cdot \left[1 - \left\{ \frac{U_A}{U_e} \right\}^2 \right] = 8/\pi \cdot k_T \cdot n_p^2 \cdot D_p^2 \quad (94)$$

In de praktijk wordt voor de uitstroomsnelheid (U_e) gevonden ($U_A/U_e \ll 1$ voor een stilliggend schip):

$$U_e = U_2 = 1,6 \cdot n_p \cdot D_p \cdot \sqrt{k_T} \quad (95)$$

Hierin is n_p = schroeftoerental (omw/s)
 D_p = schroefdiameter (m)
 k_T = stuwkrachtcoëfficiënt van de schroef, met een waarde liggend tussen 0,25 en 0,40

De invloed van het roer (met roerhoek $\delta_r = 0^\circ$) wordt in vergelijking (92) verkregen door aanpassing van de exponent van de eerste term, namelijk:

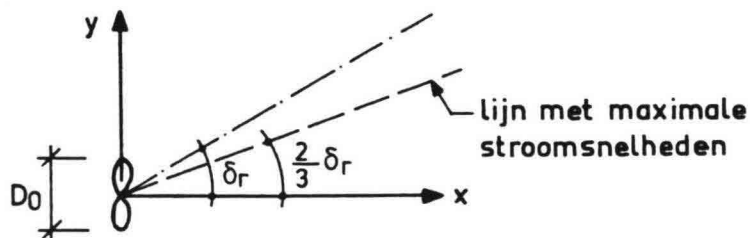
$[X_s/X']^{-1,1}$ en $[X_s/X']^{-0,6}$ voor een enkel respektievelijk dubbel roer.

Indien de invloed van de roerhoek ($\delta_r > 0^\circ$) ook nog wordt meegenomen, dan geeft dat een reductie op de stroomsnelheid; dit mede ten gevolge van de roerconfiguratie en de afbuiging van de schroefstraal. Voor de maximale stroomsnelheden bij toepassing van een enkel roer wordt dan gevonden:

$$U_{\max, s} = [1 + 5,2 \cdot 10^{-6} \cdot \delta_r^{3,25}]^{-1} \cdot [X/X']^{-1,1} \cdot U_0 \quad (96)$$

De verzameling van maximale stroomsnelheden in iedere doorsnede achter de schroef maken, in ieder geval voor $30^\circ > \delta_r > 45^\circ$, een hoek ten opzichte van de vaarrichting van ongeveer 2/3 van de roerhoek, zoals in figuur 3.32 is weergegeven.

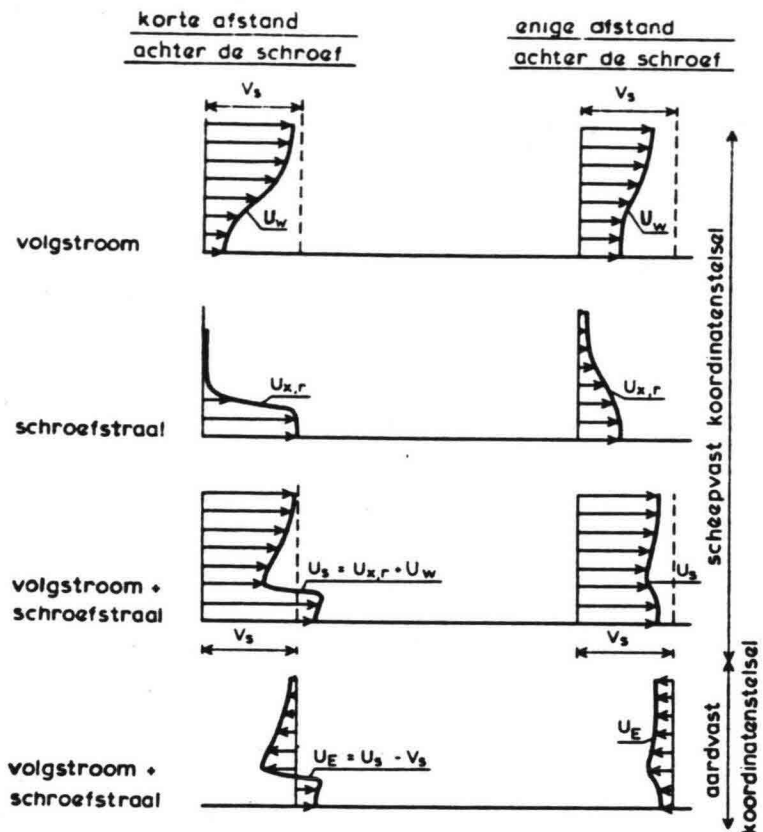
Indien de schepen voorzien zijn van meerdere schroeven, zoals bij duwbotten, dan kunnen de stroomsnelheden bij benadering berekend worden via superpositie van de voor iedere schroef afzonderlijk berekende stroomsnelheid.



Figuur 3.32. Plaats van de maximale stroomsnelheden achter de schroef

In het voorgaande is steeds sprake geweest van stilliggende schepen met een schroefstroom erachter. Achter **varende schepen** zal zoals reeds eerder vermeld een **volgstroom** gaan optreden, die de stroomsnelheden in de schroefstraal zal gaan beïnvloeden.

Uitgaande van de veronderstelling dat ook hier het superpositiebeginsel mag worden toegepast, is een berekeningsmethode ontwikkeld volgens het in figuur 3.33 gegeven principe.



Figuur 3.33. Resulterende stroomsnelheid achter de schroef

De resulterende stroomsnelheid ten opzichte van de vaarweg (U_E) volgt dan uit:

$$U_E = U_{x,r} + U_w - V_s \quad (97)$$

met $U_{x,r}$ = stroomsnelheid in de schroefstroom volgens vergelijking (92), echter met aangepaste component van de eerste term (boven op invloed roeren) en aanpassing van de coëfficiënt 15,4

U_w = volgstroom, berekend als of er geen schroefstraal werkzaam is
 V_s = vaarsnelheid van het schip.

Gezien het feit dat de optredende stroomsnelheden U_E maar zelden maatgevend zullen zijn, omdat de waarden in veel gevallen geringer zijn dan de optredende retourstroomsnelheden, wordt hier verder niet op ingegaan. Voor meer gedetailleerde vergelijkingen wordt verwezen naar Verhey [57].

Bij langs de oever afgemeerde schepen die met draaiende schroef willen vertrekken, alsmede nabij wachtplaatsen voor schepen en manoeuvreerplaatsen in de nabijheid van sluizen, loswallen en dergelijke, kunnen de beschouwingen voor stilliggende schepen worden toegepast.

Over de **ontgrondingen** die door de schroefwerking optreden is in de literatuur weinig bekend. Uitgaande van de analogie tussen ontgrondingen ten gevolge van een waterstraal en een schroefstraal, kan een benadering worden gevonden met onderzoek van Rajaratnam [58].

4. KUNSTMATIGE SCHEEPVAARTWEGEN (KANALEN EN GEKANALISEERDE RIVIEREN)

4.1. Inleiding

Zoals in hoofdstuk 1 reeds naar voren kwam heeft ons land in de loop der jaren door de aanleg van nieuwe scheepvaartkanalen en de rekonstructie en/of verruiming van bestaande natuurlijke en kunstmatige vaarwegen de beschikking gekregen over een dicht net van vaarwegen. In tabel 4.1 is de geschiedenis van de aanleg van nieuwe scheepvaartkanalen in Nederland, met het jaar waarin tot openstelling werd overgegaan, beknopt weergegeven. Voor uitgebreide informatie wordt verwezen naar Lodder [59].

Bij de aanleg van een scheepvaartkanaal spelen vele factoren een rol, die tezamen in de beschouwing meegenomen dienen te worden. Het lijkt op het eerste gezicht niet zo moeilijk om op een overzichtkaart een tracé (bestaande uit rechte vaarwegvakken welke onderling met bogen worden verbonden) uit te zetten, dat woon- en industriecentra via de kortste route verbindt en spoor- en verkeerswegen zoveel mogelijk loodrecht snijdt. In principe lijkt de keuze van het tracé en het daarmee samenhangende lengteprofiel vrij.

De praktijk leert echter anders. Uitgaande van de topografie en kadastrale kaarten dient allereerst te worden nagegaan welke belangen er gemoeid zijn bij het doorsnijden van het gebied, zodat bijvoorbeeld geen hinderlijke verkavelingen van landerijen optreden. Zie de luchtfoto van het Amsterdam-Rijnkanaal (figuur 4.1).



Figuur 4.1. Het Amsterdam-Rijnkanaal

Jaar van openstelling: Naam vaarweg [huidige bevaarbaarheidsklasse]

Vóór 1813:	Winschoterdiep [IV], Meppelerdiep [IV en III], Hoogeveense vaart [I], Ringvaart Haarlemmermeerpolder [II], Aarkanaal [III], Rijn-Schiekanaal [III]	
1819:	de Willemsvaart (IJssel-Zwolle) gesloten; in 1964 kwam daarvoor in de plaats het kanaal IJssel-Zwolle	
1825:	het Noordhollands Kanaal	[II - IV]
1826:	de Zuid-Willemsvaart	[II]
1827:	het kanaal Terneuzen-Gent (Nederlands gedeelte)	[V + zeevaart]
1829:	het kanaal door Voorne; noordelijk gedeelte vervallen	[-]
1829:	het Griftkanaal Apeldoorn-Hatterem (IJssel gesloten)	[-]
1856:	het kanaal van St. Andries (tussen Maas en Waal)	[V]
1857:	de gedeelten Zwolle-Almelo, Deventer-Lemelerveld en Vroomshoop-de Haandrik van het Overijssels Kanaal (op de gedeelten Almelo-de Haandrik en Deventer-Raalte na gesloten)	[I]
1858:	het Stadskanaal	[I]
1860:	het Oranjekanaal (in 1972 gesloten)	[-]
1861:	het Noord-Willemskanaal	[II]
1866:	het kanaal Apeldoorn-Dieren (IJssel) gesloten 1 juni 1972	[-]
1866:	het kanaal door Zuid-Beveland	[V]
1873:	het kanaal door Walcheren	[V]
1876:	het Noordzeekanaal	[V + zeevaart]
1876:	het Eemskanaal	[V]
1893:	het Merwedekanaal	[V]
1902:	het Henriëttekanaal (Dieze-Maas)	[IV]
1904:	het kanaal Almelo-Duitse grens gesloten	[-]
1915:	het Markkanaal	[III]
1923:	het Wilhelminakanaal	[II]
1927:	het Maas-Waalkanaal	[V]
1928:	het kanaal Wesseem-Nederweert (Maas-Zuid Willemsvaart)	[II]
1935:	het Julianakanaal	[V]
1936:	het kanaal Zutphen-Enschede (Twentekanaal)	[IV]
1936:	het Hilversumskanaal	[II]
1936-1941:	de Westfriese kanalen	[I - III]
1938:	het Starckenborghkanaal	[IV]
1938:	het kanaal Delden-Almelo	[IV]
1939:	het Beatrixkanaal	[II]
1951:	het Margrietkanaal en het Van Harinxmakanaal	[IV]
1952:	het Amsterdam-Rijnkanaal (en het Lekkanaal)	[V]
1964:	het kanaal IJssel-Zwolle	[V]
1970:	het 'gesloten' Hartelkanaal (verlengde Hartelkanaal in aanleg)	[VI]
1976:	het Schelde-Rijnkanaal	[VI]
1982:	het 'open' Hartelkanaal	[VI]

Tabel 4.1. Overzicht van de openstellingen van Nederlandse scheepvaartkanalen

Verder moet worden gelet op bestaande stroomgeulen, verkeerswegen, spoorwegen en leidingen in het terrein die gekruist moeten worden, en vragen de aansluitingen op het bestaande vaarwegennet om bijzondere aandacht.

Ook kan het tracé niet los worden gezien van het lengteprofiel met de daarin gelegen schutsluizen en andere kunstwerken ten behoeve van de bestaande infrastructuur, waarbij het geologisch profiel een grote rol speelt.

Kultuurbelangen kunnen worden geschaad wanneer het grondwaterpeil door de kanaalaanleg wordt verhoogd of verlaagd. De waterhuishouding van het doorsneden gebied speelt dan ook een belangrijke rol, zowel wat het oppervlaktewater als het grondwater betreft. Voor het kanaal dient dan ook een waterbalans te worden opgemaakt.

Naast de waterbalans dient tevens een grondbalans te worden opgemaakt.

Tenslotte kan heel algemeen gesteld worden dat de aanleg van een scheepvaartkanaal gerechtvaardigd is, indien de kosten van aanleg, onderhoud en exploitatie vermeerderd met de vervoerskosten per ton vervoerde lading lager zijn dan de kosten middels bestaande vaarwegen of andere vervoerswegen met andere vervoersmiddelen.

De **dimensionering van het dwarsprofiel** hangt zeer sterk samen met de te verwachten verkeersintensiteit en met de keuze van de klasse vaarweg, wat uiteraard weer samenhangt met de klasse van de bestaande aansluitende vaarwegen.

Bij de ontwikkeling van het Nedelandse vaarwegennet zijn er de afgelopen 25 jaar bijna geen nieuwe vaarwegverbindingen bijgekomen.

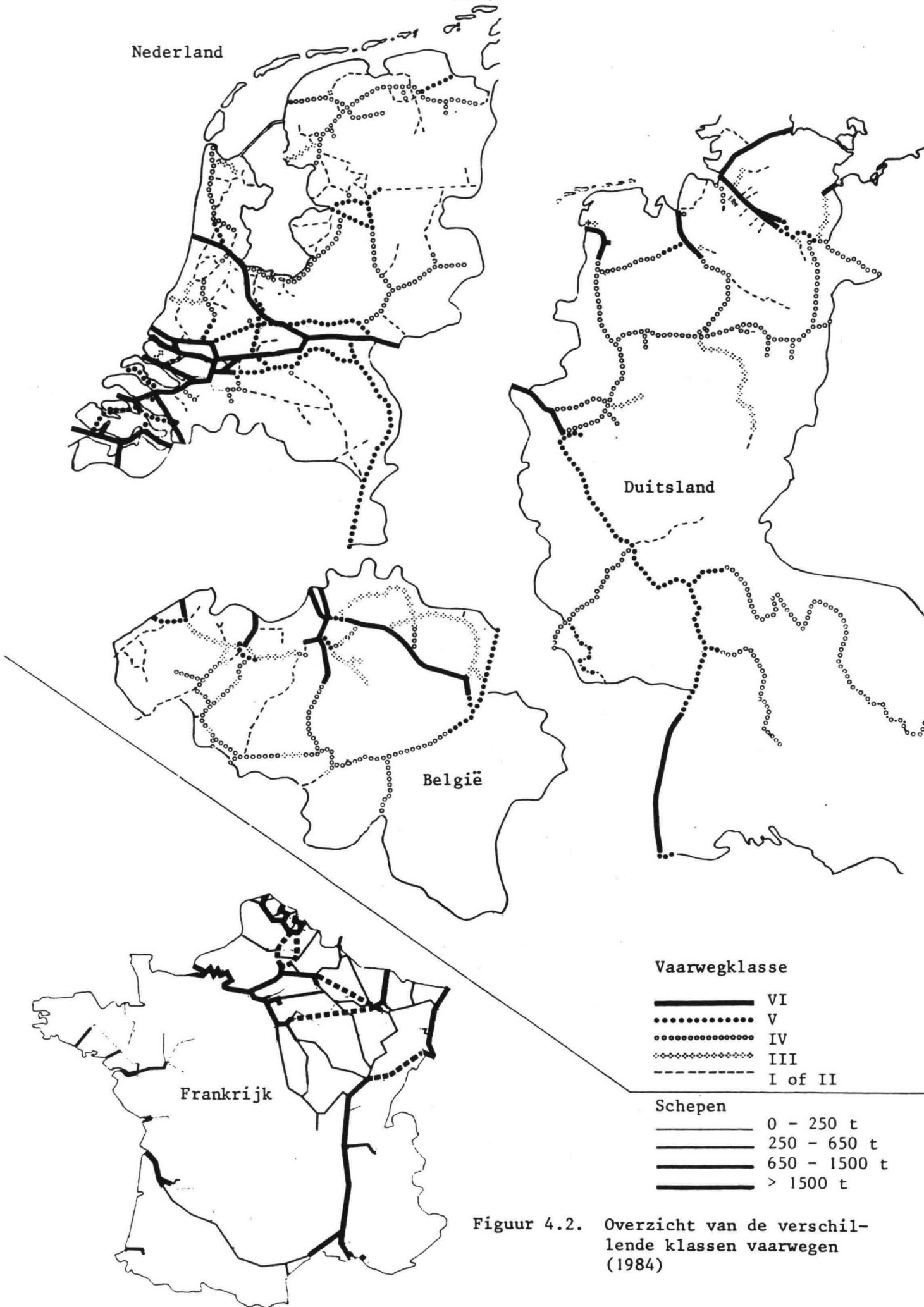
Wel werden er naast de aanleg van het Rijn-Scheldekanaal een aantal belangrijke doorgaande vaarwegen verbeterd en geschikt gemaakt voor de vierbaksduwvaart zoals het Hartelkanaal, de Oude Maas, de Dordtsche Kil, de Nieuwe Maas en het Amsterdam-Rijnkanaal. De havens van Antwerpen en Amsterdam werden hierdoor voor de duwvaart ontsloten, terwijl de haven van Rotterdam beter bereikbaar werd. Met het buiten bedrijf stellen van de Hartelsluizen is het Hartelkanaal een open vaarweg met getijbeweging geworden, zodat Rotterdam nu ook rechtstreeks voor de zesbaksduwvaart bereikbaar is.

Daarnaast werd door België de beruchte "stop van Ternaaien" in de Maasroute opgeheven door de bouw van een nieuwe schutsluis van klasse V in plaats van de bestaande klasse II. Nederland heeft in aansluiting hierop een aantal schutsluizencomplexen op de Maasroute vervangen door sluizen die geschikt zijn voor tweebaksduwvaart, waardoor tevens de capaciteit aanzienlijk is toegenomen.

Verder worden een aantal kleinere vaarwegen met een belangrijk regionale ontsluitingsfunctie, zo mogelijk tot klasse IV, verbeterd. Een goed voorbeeld hiervan is de verbetering en omlegging van de Zuid-Willemsvaart. In het struktuurschema vaarwegen deel a [60] is een plangericht overzicht van al deze verbeteringen voor de toekomst aangegeven.

Tenslotte dient nog vermeld, dat er in deze afgelopen periode ook een groot aantal kleine vaarwegen voor de scheepvaart zijn gesloten, zoals: het Apeldoorns kanaal, een deel van de Overijsselse kanalen, de Dedemsvaart, het Oranjekanaal, het Linthorst Homankanaal, het kanaal door Voorne en het Eindhovens kanaal. Deze sluitingen hielden ondermeer verband met de hoge bedienings- en onderhoudskosten bij een zéér lage intensiteit van de scheepvaart.

Inmiddels gaan er stemmen op om een aantal kanalen weer open te stellen voor de in de laatste 15 jaar sterk toegenomen recreatievaart. Hierbij wordt gedacht aan zelfbedieningssluisjes, zoals in Engeland reeds veel worden toegepast. Bij krappe kanaalprofielen, zoals bijvoorbeeld het kanaal Raalte-Deventer, is zelfs overwogen om éénstrooksverkeer in te stellen. Aangezien de intensiteit erg laag is zou het dan mogelijk moeten zijn om in konvooi te varen, waarbij het bedieningspersoneel in een busje langs de oever vooruitrijdt om de bruggen en sluizen te bedienen.



Figuur 4.2. Overzicht van de verschillende klassen vaarwegen (1984)

Om een indruk te geven omtrent de toegankelijkheid voor bepaalde scheepsgrootten van het vaarwegennet in Nederland en omliggende landen is dit voor het jaar 1980 in tabel 4.2 weergegeven. Figuur 4.2 geeft voor deze landen een overzicht van de verschillende klassen vaarwegen (toestand 1984). Hierbij zij opgemerkt dat Frankrijk een andere klasseindeling hanteert dan Nederland, België en Duitsland, namelijk naar tonnage in plaats van naar scheepsafmetingen.

E.E.G.-klassificatie		Nederland		België		Duitsland		Frankrijk	
klasse vaarweg	toegankelijk voor schepen van .. ton	lengte vaarweg (km)	(%)	lengte vaarweg (km)	(%)	lengte vaarweg (km)	(%)	lengte vaarweg (km)	(%)
0	50 - 250	981	20,2	8	0,5	236	5,2	353	5,4
I	250 - 400	440	9,1	332	22,0	111	2,5	3713	56,5
II	400 - 650	863	17,8	538	35,7	216	4,8	213	3,2
III	650 - 1000	197	4,1	-	-	794	17,6	355	5,4
IV	1000 - 1500	684	14,1	291	19,3	2035	45,0	36	0,6
V	1500 - 3000	1126	23,2	222	14,7	648	14,3	248	3,8
VI	> 3000	555	11,5	118	7,8	480	10,6	1650	25,1
Totaal		4843	100,0	1509	100,0	4520	100,0	6568	100,0

Tabel 4.2. Aanwezige lengte van vaarwegen voor verschillende scheepsgrootten (toestand 1980)

Zoals uit tabel 4.2 blijkt heeft Nederland, gezien zijn geringe oppervlak, relatief de meeste vaarwegen. Dit geldt in het bijzonder voor het grote percentage klasse V en VI vaarwegen, waarvan het grootste deel echter uit natuurlijke vaarwegen bestaat.

Opvallend is verder het grote aantal kleine vaarwegen van vaarwegklasse 0 t/m III in de Noord-Zuid richting Nederland, België en Frankrijk. Dit in tegenstelling tot Duitsland waar een vrij groot percentage vaarwegklasse IV aanwezig is.

Voor wat betreft de ontsluiting van Nederland via de Rijn met het achterland kan worden aangegeven dat Duitsland momenteel de laatste fase van de Rijn-Main-Donau-verbinding in uitvoering heeft genomen.

Deze verbinding tussen de Noordzee en de Zwarte Zee vormde in de geschiedenis steeds een gewichtig element van politieke betekenis. Op 11 mei 1938 werd reeds een wet aangenomen waarin bepaald werd dat dit grootse samenspel van rivieren en kanalen ten behoeve van de grote scheepvaart vóór 1945 gereed zou moeten zijn. De economie zou er door bevorderd worden, waar echter tegenover stond dat de Nederlandse, Italiaanse en Franse zeehavens op den duur de weerslag ervan zouden ondervinden. De Tweede Wereldoorlog heeft de uitvoering hiervan slechts uitgesteld. Nu de voltooiing dan eindelijk nabij is, dreigt er weer een economisch probleem te ontstaan omdat de Oostbloklanden met goedkoop vervoer het Westen economisch onevenredig zullen treffen.

Daarnaast bestaan er in Frankrijk vergevorderde plannen om een verbinding te maken tussen de Saône en de Rijn, geschikt voor duweenheden van tenminste 4000 ton en 3 m diepgang. Indien de aanleg van deze Saône-Rijnverbinding door zou gaan, dan zou daarmee een verbinding tot stand worden gebracht tussen de Middellandse Zee en de Noordzee. In bijlage 2 wordt dit projekt uitgebreid beschreven.

4.2 Dimensionering van het dwarsprofiel

4.2.1 Klasse-indeling en afmetingen van maatgevende schepen

De afmetingen van het dwarsprofiel van een scheepvaartkanaal worden in hoofdzaak bepaald door de zogenaamde maatgevende verkeerssituaties. Hierbij spelen de afmetingen van de toe te laten schepen met hun grote diversiteit en frekwentie van voorkomen (gekoppeld aan de intensiteiten van de scheepvaart) en hun vereiste vaarsnelheden (gekoppeld aan het motorvermogen) een grote rol. Uiteraard speelt de ontwikkeling van het goederen-transport op de binnenwateren, in samenhang met de invoering van mogelijk nieuwe of aangepaste typen binnenschepen, vertaald naar toekomstprognoses voor beiden een doorslaggevende rol.

Bij het dimensioneren van het dwarsprofiel gaat het om de vraag welke **minimale** afmetingen voor een recht vaarwegvak nodig zijn om, gegeven de (toekomstige) scheepsafmetingen en intensiteiten, een voldoende vlotte en veilige verkeersafwikkeling te kunnen garanderen.

Allereerst is hiertoe in 1954 in Europees verband binnen de CEMT (Commission Européenne des Ministres de Transport) een poging gedaan om de binnenvloot te normeren door de scheepvaartwegen in klassen in te delen, en daarbij standaardschepen per klasse als maatgevende schepen te gaan hanteleren. In tabel 2.5 is deze, voor Nederlandse omstandigheden aangepaste indeling met toevoeging van klasse 0, reeds gegeven.

De Commissie Vaarwegenbeheerders geeft verder in een nota [61] **voor rekonstruktie van kleinere vaarwegen** de in tabel 4.3 weergegeven maatgevende horizontale scheepsafmetingen. Voor **nieuw aan te leggen vaarwegen** gelden dan dezelfde maatgevende afmetingen, uitgezonderd klasse IIa welke hierbij komt te vervallen.

klasse	scheepslengte (m)	scheepsbreedte (m)
I	39	5,10
II	55	6,60
IIa	56 - 67	7,20
III	67 - 80	8,20
IV	85	9,50

Tabel 4.3. Maatgevende horizontale scheepsafmetingen voor rekonstruktie van kleinere vaarwegen [61]

Ten aanzien van de **scheepsbreedten** binnen de West-Europese binnenvloot blijkt dat de in 1954 gestandaardiseerde breedte-maten goed worden aangehouden. Dit geldt ook voor de klasse V en VI.

Ten aanzien van de **scheepslengten** is dit minder het geval. Alleen de klasse I is scherp gestandaardiseerd, vooral in verband met de aanwezigheid van kleinere sluislengten. Bij de andere klassen, misschien met uitzondering van de grotere klassen V en VI, komt meer spreiding voor. Er moet voor de toekomst rekening worden gehouden met grotere scheepslengten. Door toevoeging van de representatieve bovengrens wordt voor de scheepslengten wel uitgegaan van de in tabel 4.4 opgenomen waarden.

klasse	I	II	III	IV	V	VI	VII
scheepslengte (m)	39	50-60	67-80	80-95	95-110	185	193

Tabel 4.4. Scheepslengten voor de verschillende vaarwegklassen

Ten aanzien van de **diepgang** komt per klasse een veel grotere spreiding voor. Er is namelijk een trend gaande om steeds diepere schepen te gaan bouwen. Voor duwbakken gold tot 1970 bijvoorbeeld voor de route Europoort-Ruhrgebied een maximum van 3,20 m, terwijl tegenwoordig 4,00 m al heel gebruikelijk is. Eenzelfde tendens treedt op bij nieuwbouw schepen in de klassen III, IV en V. De Commissie Vaarwegbeheerders geeft in haar nota [61] dan ook geen waarden voor de maatgevende diepgang van de verschillende maatschepen. Dit is mede gebaseerd op het feit dat de diepgang minder bepalend is voor de toegankelijkheid van een vaarweg voor dat betreffende schip, aangezien de diepgang immers varieert al naar gelang de hoeveelheid lading (de beladingsgraad λ) die wordt ingenomen. Onder de beladingsgraad wordt hier verstaan:

$$\lambda = \frac{\text{hoeveelheid vervoerde lading (t)}}{\text{het laadvermogen van het schip (t)}} \times 100\%$$

Wel wordt in deze nota gesteld dat een economische optimale diepgang bepaald dient te worden met behulp van een kosten-batenbeschouwing (financiële voordelen van een grotere diepgang afwegen tegen de extra kosten voor de aanleg van een dieper kanaal). Dit is slechts per vaarweg mogelijk, gezien de verschillen in aard en omvang van de te vervoeren lading, verwachte vlootsamenstelling, grondsoort, aanwezige infrastructuur met wegen, dijken en kunstwerken, bebouwing langs het kanaal, enz.

Door de werkgroep Vaarwegvakken is in deelrapport III [62] uit praktische overwegingen gekozen voor een meer globale aanpak. Uitgegaan is van de diepgang van de na 1945 gebouwde vloot. De vooroorlogse vloot, welke thans nog 40 à 50% van de actieve vloot uitmaakt, heeft namelijk gemiddeld een 1 à 2 dm geringere diepgang. Aangezien aangenomen wordt dat de vooroorlogse vloot geleidelijk zal gaan verdwijnen, wordt deze niet meegenomen in de verdere beschouwing, hetgeen tijdelijk tot enige overdimensionering kan leiden.

klasse	$\lambda = 100\%$			$d_{50\%}$		
	$d_{10\%}$	$d_{50\%}$	$d_{90\%}$	$\lambda = 70\%$	$\lambda = 80\%$	$\lambda = 90\%$
I	2,00	2,40	2,55	1,80	2,00	2,20
II	2,30	2,50	2,70	1,90	2,10	2,30
III	2,30	2,60	2,70	2,00	2,20	2,40
IV	2,55	2,80	3,10	2,10	2,30	2,60
V		3,20				
VI+VII		3,20-4,00				

Tabel 4.5. Diepgangen (in m) van naoorlogse schepen

Als basis voor het afleiden van de **maatgevende diepgang ten behoeve van het dimensioneren van (kleine) kanalen** is $d_{50\%}$ gekozen, hetgeen aangeeft dat 50% van de naoorlogse schepen (met beladingsgraad $\lambda = 1$) in de be-

schouwde klasse een maximum diepgang heeft die kleiner of gelijk is aan deze diepgang. In tabel 4.5 zijn voor de verschillende klassen enkele karakteristieke waarden voor de diepgang gegeven.

Uit de tabel blijkt dat de verschillen tussen $d_{50\%}$ en $d_{90\%}$ slechts 1 à 2 dm bedragen, hetgeen voor kleine kanalen, waarop ook nog veel vooroorlogse schepen varen, praktisch geen problemen oplevert.

Hier komt nog bij dat de schepen veelal niet tot hun maximale diepgang ($\lambda = 1$) worden afgeladen. Schepen die bouwmaterialen vervoeren met een **hoog volumegewicht** (zand, grind, cement e.d.) zouden in principe praktisch tot aan hun maximale diepgang ($\lambda = 0,95$) kunnen worden afgeladen. In de praktijk zijn er nogal eens beperkingen in beladingsgraad ten gevolge van lage waterstanden op aansluitende rivieren of indien de aangeboden partijgrootte kleiner is dan het laadvermogen. Dit laatste komt echter weinig voor bij het zand- en grindvervoer.

Schepen die agrarische produkten vervoeren met een **laag volumegewicht** (granen, veevoerders, kunstmest e.d.) tussen de 550 en 700 kg/m³ hebben een veel lagere beladingsgraad, aangezien hierbij de ruiminhoud van de schepen maatgevend is. Als vuistregel geldt dat de ruiminhoud in m³ voor spitsten gelijk is aan 1,15 x het laadvermogen in tonnen, terwijl deze verhouding voor de overige schepen ligt bij 1,35 à 1,40. De beladingsgraad λ ligt daarom tussen $\lambda = 0,70$ en $\lambda = 0,90$ voor goederen met een volumegewicht van 600 à 650 kg/m³, hetgeen volgens tabel 4.5 aanmerkelijk geringere diepgangen oplevert.

Door de werkgroep Vaarwegvakken is bij het opstellen van de normen voor het dimensioneren van vaarwegdwarsprofielen voor de kleinere klasse I t/m III vaarwegen onderscheid gemaakt tussen "krappe" en "normale" profielen als het gaat om tweestrooks vaarwegen. Daarnaast zijn nog normen ingevoerd voor éénstrooks vaarwegen.

In de regel kan ruwweg gesteld worden, dat voor verkeersintensiteiten tussen 1000 en 20.000 schepen per jaar zonder meer moet worden uitgegaan van een tweestrooks vaarweg. Bij extreem lage intensiteiten (minder dan 1000 schepen per jaar, dus minder dan 1,5 schip per dag per vaarrichting) kan bij niet te lange kanaalpanden eventueel gedacht worden aan afwisselend éénrichtingsverkeer. Een dergelijk profiel moet dan gezien worden als een echt minimum profiel, waarin varen met het enkelvoudige maatgevende schip, nautisch gezien, nog aanvaardbaar is.

Bij toepassing van een zogenaamd krapp profiel (minder dan 5000 schepen per jaar) moet **voorzichtig ontmoeten** van twee geladen schepen en **voorzichtig oplopen** van een geladen schip door een leeg schip mogelijk zijn. Voorzichtig betekent hier dat de vaarsnelheid met circa 50 à 70% moet worden verminderd.

Bij toepassing van een zogenaamd normaal profiel moet **vlot (normaal) ontmoeten** van twee geladen schepen en **voorzichtig oplopen** van een geladen schip door een ander geladen schip mogelijk zijn. Vlot betekent hier dat de manoeuvre slechts met weinig snelheidsvermindering (maximaal 30%) plaatsvindt.

Samenvattend kan gesteld worden dat voor het bepalen van de maatgevende diepgangen steeds wordt uitgegaan van $d_{50\%}$, maar dat bij het onderscheid tussen enerzijds normale tweestrooks profielen en anderzijds krappe tweestrooks profielen en éénstrooks profielen verschil wordt gemaakt tussen de toe te laten beladingsgraad.

In tabel 4.6 zijn de maatgevende diepgangen (d_m) met hun maatgevende beladingsgraad (λ_m) weergegeven.

klasse	$d_{50\%}$	λ_m (%)		d_m (m)		laadverm. (t) bij d_m	
	(m)	1)	2)	1)	2)	1)	2)
I	2,40	85	100	2,10	2,40	300	350
II	2,50	95	100	2,40	2,50	570	600
IIa	2,55	95	100	2,40	2,55	660	700
III	2,60	95	100	2,40	2,60	950	1000
IV	2,80	90	100	2,60	2,80	1350	1500

- 1) éénstrooks profiel en krap tweestrooks profiel
 2) normaal tweestrooks profiel

Tabel 4.6. Maatgevende diepgangen en beladingsgraden

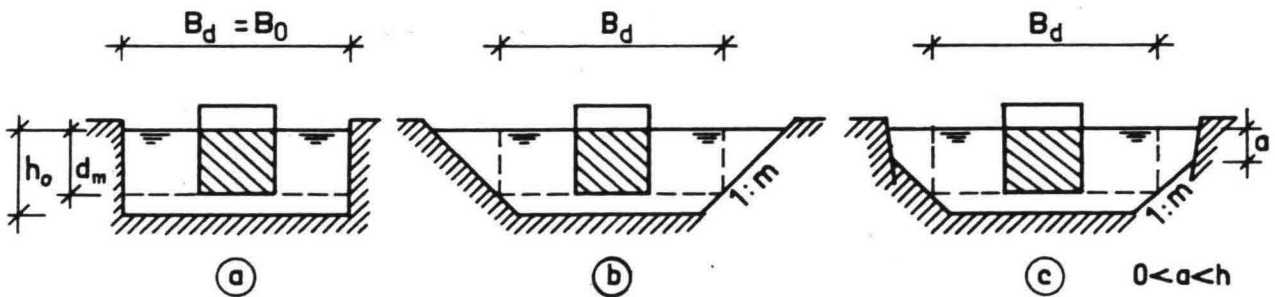
Opm.: Aangezien klasse IV vaarwegen vaker bevaren worden door schepen van een lagere klasse dan door het maatgevende klasse IV schip (dit verschijnsel speelt veel minder bij vaarwegen van lagere klasse) wordt bij het krappe profiel uitgegaan van een maatgevende beladingsgraad van 90% in plaats van 95%. Schepen van de lagere klassen kunnen bij deze diepgang toch een beladingsgraad van 100% halen.

Bij zeer hoge verkeersintensiteiten, zoals bijvoorbeeld op het Amsterdam-Rijnkanaal (65.000 schepen per jaar), moet worden overgegaan op een drie of meerstrooks vaarweg.

4.2.2. Vorm en parameters van het dwarsprofiel

Voor wat betreft de vorm van het dwarsprofiel wordt voor de praktijk onderscheid gemaakt tussen (zie figuur 4.3):

- een bakprofiel,
- een trapeziumvormig profiel en
- een gebroken profiel



Figuur 4.3. Mogelijke vormen van het dwarsprofiel

De afmetingen van het vaarwegdwarsprofiel kunnen nu worden uitgedrukt in een drietal dimensieloze parameters, namelijk:

h_0/d_m = diepteparameter, betrokken op de werkelijk aanwezige waterdiepte,
 B_d/b = breedteparameter, betrokken op het kielvlak van het schip, en
 A_s/A_c = oppervlakteparameter (= $1/k$, met k = blokkagefactor).

Alleen voor het bakprofiel geldt dat:

$$\{h_o/d_m\} \cdot \{B_d/b\} = 1/\{A_s/A_c\} = k$$

Voor het trapeziumvormig en het gebroken profiel geldt:

$$\{h_o/d_m\} \cdot \{B_d/b\} < 1/\{A_s/A_c\}$$

In de navolgende paragrafen zullen de drie genoemde parameters voor wat betreft hun minimale en gewenste waarden aan een nader onderzoek worden onderworpen.

De h_o/d_m -parameter is sterk bepalend voor de bestuurbaarheid en daarna voor de vaarsnelheid van het schip.

De B_d/b -parameter is sterk bepalend voor de toelaatbare verkeersintensiteit, zoals reeds eerder genoemd bij het bepalen van het aantal vaarstroken, in verband met ontmoetingen en oplooptmanoeuvres.

De A_s/A_c -parameter is, zoals in hoofdstuk 3 reeds aan de orde is gekomen, in sterke mate bepalend voor de weerstand en daarmee voor de vaarsnelheid van de schepen.

4.2.3. Normen voor de vaarwegdiepte (h_o/d_m)

De minimum diepte van een vaarweg wordt voornamelijk bepaald door de toegestane diepgang en de snelheid van het maatgevende schip. Terwille van een goede **bestuurbaarheid** mag de ruimte onder het schip (kielspeling) niet te klein worden genomen. Deze overdiepte wordt tijdens het varen veranderd door de spiegeldaling ten gevolge van de retourstroom, het golfpatroon rondom het schip en het achteroverhellen van het schip (trim).

De spiegeldaling wordt, zoals blijkt uit hoofdstuk 3, in eerste instantie bepaald door de vaarsnelheid (V_s) en de parameter A_s/A_c .

In tweede instantie speelt daarbij de gemiddelde waterdiepte ($\bar{h} = A_c/B_o$) een belangrijke rol. Dit kan voor de grenssnelheid (V_{gr}) bijvoorbeeld direkt uit figuur 3.4 worden aangetoond.

Bij gegeven A_s/A_c kunnen de waarden voor V_{gr}/\sqrt{gh} , U_{gr}/\sqrt{gh} en Z_{gr}/\bar{h} uit de figuur worden afgelezen.

Daaruit blijkt dan dat de waarden voor V_{gr} , U_{gr} en Z_{gr} toenemen als de gemiddelde waterdiepte groter wordt.

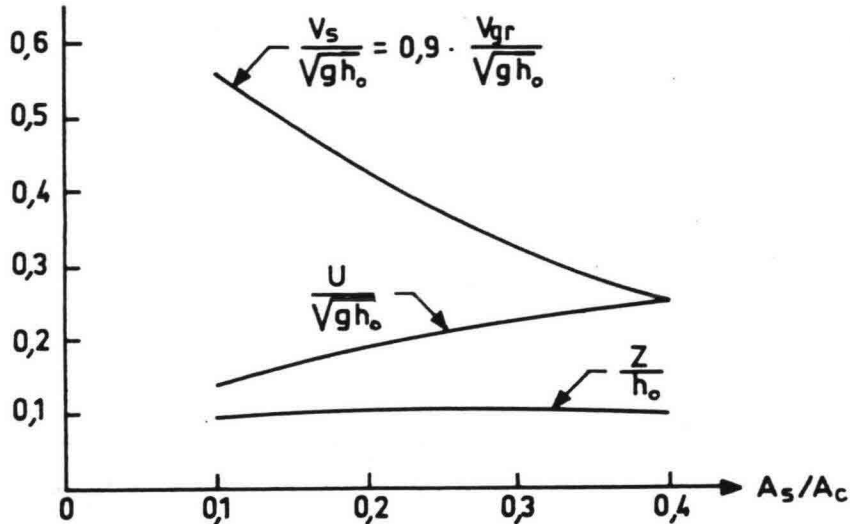
De parameter h_o/d_m voor het bepalen van de werkelijk aanwezige waterdiepte (h_o) - dus niet de gemiddelde waterdiepte (\bar{h}) - gaat uit van een situatie waarbij het schip **stilligt**. Beter zou het uiteraard zijn om te rekenen met een parameter $\{1 - Z/h_o\} \cdot h_o/d_m$, omdat dit de werkelijke situatie tijdens het varen weergeeft.

Hierbij is dan wel weer uitgegaan van de veronderstelling dat de water-spiegeldaling gelijk is aan de inzinking van het schip. Zoals we reeds eerder zagen blijkt echter de waarde van Z/h_o afhankelijk te zijn van vele factoren, zoals de vaarsnelheid, de blokkagefactor en de gemiddelde waterdiepte. Voor een trapeziumvormig kanaal (talud 1:m) geldt volgens vergelijking (39):

$$\bar{h} = \{1 - m \cdot h_o/B_o\} \cdot h_o$$

zodat de spiegeldaling ook nog afhankelijk is van de taludhelling en de aanwezige waterspiegelbreedte. Verder bleek reeds eerder dat bij het varen buiten de as van het kanaal de spiegeldaling nog verder toeneemt.

Om toch een indruk te krijgen van de grootte van onder andere de parameter Z/h_0 , is dit in figuur 4.4, voor een bakprofiel met behulp van de energiemethode Schijf met α -coëfficiënt volgens vergelijking (13), voor het toepassingsgebied $0,1 < A_s/A_c < 0,4$ weergegeven. Hierbij is uitgegaan van de veronderstelling dat de schepen met een zogenaamde **haalbare snelheid** ter grootte van 90% van de grenssnelheid varen. Deze veronderstelling is door prototype-metingen bevestigd. Uit figuur 4.4 blijkt dan dat de waarde van de parameter Z/h_0 in het toepassingsgebied praktisch konstant is: $Z/h_0 \approx 0,10$. Dit komt neer op een halvering van de waarde zoals gevonden bij de grenssnelheid (zie figuur 3.4).



Figuur 4.4. Retourstroom en spiegeldaling bij de haalbare vaarsnelheid (dit is 90% van de grenssnelheid)

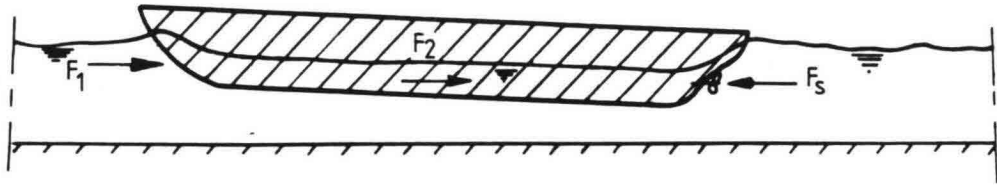
Hogere vaarsnelheden tot 95% van de grenssnelheid (volgens Schijf) zijn bij de gebruikelijke motorvermogens in het algemeen wel haalbaar, maar dit vergt onevenredig hogere brandstofkosten. Bovendien gaat bij deze vaarsnelheden de bestuurbaarheid problemen geven ten gevolge van oever- en bodemzuiging.

Voor wat betreft de sekundaire scheepsgolven wordt de golfhoogte sterk bepaald door de diepte van het kanaal. Bij toename van de vaarsnelheid zal de scheepsgolf op een gegeven moment de bodem gaan "voelen". Dit blijkt bij onbeperkte kanaalbreedte het geval te zijn indien de vaarsnelheid $V_s > 0,74 \cdot \sqrt{g \cdot h_0}$ wordt.

Bij beperkte breedte zal dit eerder gaan optreden, omdat de bepalende waterdiepte h sterker zal afnemen door onder andere de spiegeldaling. Daardoor komt deze maatgevende vaarsnelheid in de buurt te liggen van $0,5 \text{ à } 0,6 \cdot \sqrt{g \cdot h_0}$. Zoals uit figuur 4.4 blijkt komt dit bij het toepassingsgebied voor scheepvaartkanalen praktisch niet voor.

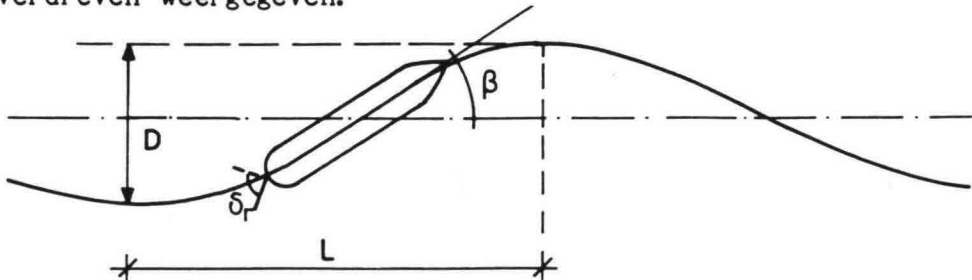
Het achteroverhellen van het schip wordt onder andere veroorzaakt door het niet samenvallen van de schroefkracht en de optredende weerstandskrachten op een schip en door het ten gevolge van de retourstroom ontstane langsverhang (zie figuur 4.5). Dit verschijnsel, in samenhang met inzinking en trim, wordt **squat** genoemd. Dit is dus het maximale verschil in diepgang tussen een varende en een stilliggend schip. Bij (voorover) geladen schepen (voorwaartse trim) gaat dit pas bij hoge vaarsnelheden een rol spelen,

terwijl de trim van lege schepen weliswaar groter is, maar gezien de geringere diepgang geen maatgevende situatie oplevert. Lege schepen worden wel bewust achterover getrimd om voldoende druk op het roer te krijgen.



Figuur 4.5. Squat

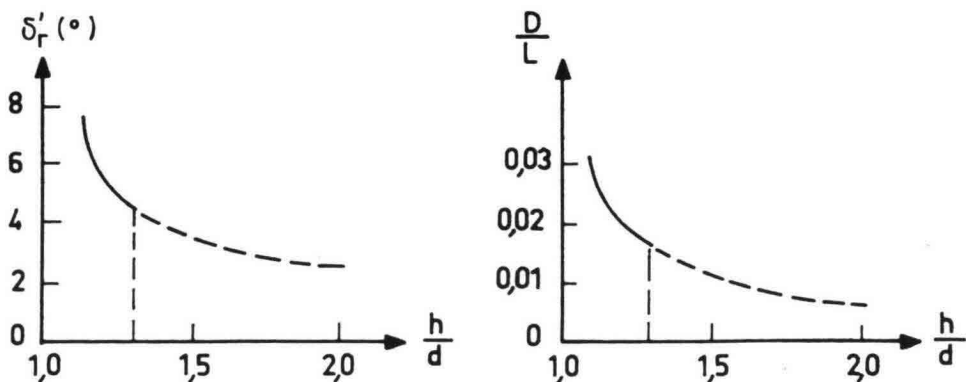
Tijdens het varen van een schip volgens de kanaalas zal, door het dynamische karakter van het min of meer labiele evenwicht tijdens het varen, voortdurend met het roer gekorrigeerd dienen te worden. In figuur 4.6 is dit overdreven weergegeven.



Figuur 4.6. Scheepskoers ten gevolge van labiel evenwicht

Als criterium voor de bestuurbaarheid wordt de gemiddelde roerweg genomen. Deze wordt bepaald door de roerhoek (δ_r') en het driftgetal (D/L). De roerhoek is de som van twee uiterste, aan elkaar tegengestelde, roeruit-slagen. Het driftgetal is de verhouding tussen de som D van twee opeenvolgende maximale dwarsafwijkingen, en de (tijdens deze afwijkingen) afgelegde weg L . Het driftgetal blijkt een functie te zijn van de scheepslengte (l), en neemt toe naarmate het schip langer is (traagheidseffekt).

Uit de literatuur en uit vele proefnemingen [63] is gebleken dat een minimale overdiepte van 30 à 40% gewenst is voor een goede bestuurbaarheid. Indien de diepteparameter $h_0/d_m < 1,3$ wordt, dan neemt de bestuurbaarheid zeer snel af, zoals uit figuur 4.7 duidelijk blijkt. Dit percentage voor de overdiepte zal uiteraard groter moeten zijn wanneer, ten gevolge van windgolven, stampen en rollen van het schip gaat optreden. Dit komt vooral voor in het getijdgebied van delta's en dergelijke.



Figuur 4.7. Verband tussen overdiepte en bestuurbaarheid (roerhoek en driftgetal)

Uit een inventarisatie van dwarsprofielen van bestaande Nederlandse kanalen in 1980 [64] zijn echter voor de vaarwegklassen I t/m III als meest voorkomende waarde $h_o/d_m = 1,2$ en $h_o - d_m = 0,50$ m gevonden. Dit komt omdat de huidige Nederlandse vaarwegen van deze klassen, meestal zijnde geen doorgaande vaarwegen, lang geleden reeds zijn aangelegd of als vaarweg in gebruik zijn genomen. Zij zijn dus niet ontworpen op de huidige moderne vloot, maar op schepen met zeer lage vaarsnelheden. Mede gezien de geringe verkeersintensiteit op deze kanalen kan de "meest voorkomende waarde" van 1,2 niet normatief gesteld worden voor het reeds eerder genoemde "normale profiel".

Door de zeer kleine kielspeling treedt bij grotere vaarsnelheden verder gemakkelijk bodemerosie op door de schroefstraal, waardoor bodemoneffenheden en sporen ontstaan met de kans op vastlopen van schepen.

Uit de inventarisatie van klasse IV vaarwegen bleek dat hiervoor als meest voorkomende waarde een h_o/d_m -verhouding van 1,35 à 1,4 werd gevonden. Een groot deel van de klasse IV vaarwegen, over het algemeen lange vaarwegen met doorgaande vaart en vrij hoge verkeersintensiteiten, is dan ook aangelegd of gerekonstrueerd na 1935, op een moment dat er reeds moderne motorschepen waren. Deze geïnventariseerde klasse IV kanalen zijn dan ook in overwegende mate gedimensioneerd op verkeerssituaties die overeenstemmen met het begrip "normaal profiel".

In Duitsland wordt voor nieuw te graven kanalen een h_o/d_m -verhouding van minimaal 1,5 aangehouden, zeker als er sprake is van duwvaart. Toch is men over het algemeen voorzichtig met het toepassen van grotere h_o/d_m -waarden, welke vanuit nautisch oogpunt aantrekkelijk zijn in verband met de hogere vaarsnelheden. Een grote kielspeling blijkt in de praktijk namelijk tot pressie op vaarwegbeheerders te leiden teneinde met nog grotere diepgang te mogen varen (een grotere diepgang is dan namelijk economischer dan harder varen).

Een mooi voorbeeld vormen de na 1955 in Duitsland verruimde kanalen van klasse IV. Uitgaande van een ontwerpnorm $h_o/d_m > 1,6$ werd bij een diepgang van het maatgevende schip van $d_m = 2,50$ m een waterdiepte van $h = 4$ m genomen (klasse IV schip met 1350 ton lading bij een vaarsnelheid van 11 km/h). Nu wordt echter op deze kanalen een diepgang toegestaan van 2,80 m ($h_o/d_m = 1,4$), waardoor de schepen 16% meer lading kunnen vervoeren bij een afgenomen snelheid tot 10 km/h. Binnen de totale reiscyclus is de invloed van deze ene km/h (11 - 10 km/h) namelijk alleen van toepassing op het geladen varen (los- en laadtijden, schut- en wachttijden en leegvaart veranderen niet).

Konkluderend kan gesteld worden, dat voor lange, vrij druk bevaren doorgaande kanalen van de hogere vaarwegklassen (de zogenaamde normale profielen) $h_o/d_m \geq 1,4$ genomen moet worden.

Voor de kortere ontsluitingskanalen en/of weinig intensief bevaren vaarwegen van veelal lagere vaarwegklasse (de krappe profielen of de éénstrooks vaarwegen) mag volstaan worden met $h_o/d_m = 1,3$.

Voor duwvaartkanalen wordt tenslotte $h_o/d_m \geq 1,5$ aanbevolen.

4.2.4. Normen voor de vaarwegbreedte (B_d/b)

De vereiste breedte van een vaarweg hangt in sterke mate samen met

- de (toekomstige) verkeersintensiteit, en
- de frekwentie van voorkomen van bepaalde typen (maatgevende) schepen.

Beide zijn namelijk van belang voor de benodigde vaarstrookbreedten.

Een nieuw aan te leggen kanaal zal over tenminste twee vaarstroken ("normaal profiel") beschikken. Bij grote variatie in snelheid tussen de verschillende typen schepen wordt het veelal noodzakelijk om een derde, zogenaamde inhaalstrook toe te passen. Bij sterke toename van de verkeersintensiteit kan het zelfs noodzakelijk zijn om een vierde strook toe te passen.

De afmetingen van de vaarstroken worden, evenals bij de vereiste vaarwegdiepte, in hoge mate bepaald door de afmetingen van de maatgevende schepen, en wel in het bijzonder door de maatgevende breedte.

Naarmate er meer vaarstroken worden toegepast speelt de breedte van het grootste maatgevende schip echter een steeds minder dominerende rol. Dit hangt sterk samen met de frekwentie van voorkomen van genoemd schip. Wordt dit schip op een vaarweg slechts zelden verwacht, dan kan het economisch gezien zelfs verantwoord zijn om aan deze schepen een snelheidsbeperking op te leggen. Wanneer de frekwentie van voorkomen in de toekomst echter groter wordt, dan zal men ervoor dienen te zorgen dat twee van deze schepen elkaar zonder gevaar kunnen ontmoeten.

Achtereenvolgens zal in deze paragraaf worden behandeld:

- a. Scheepvaart in de as van het kanaal.
- b. Scheepvaart buiten de as van het kanaal.
- c. Ontmoetingen van twee schepen.
- d. Inhaalmanoeuvre van twee schepen.
- e. Veiligheidsstroken.

a. Scheepvaart in de as van het kanaal

De vaarstrookbreedte voor een in de as van het kanaal varend schip zal altijd groter zijn dan de scheepsbreedte, omdat het niet mogelijk is om in een rechte lijn te varen. Er zullen steeds storende zijdelingse invloeden optreden door diskontinuiteiten in het lengteprofiel van het kanaal, met dwarsstromen, wind- en translatiegolven en vooral zijwind op het bovenwaterschip. De stuurman zal hierop, afhankelijk van zijn waarnemings- en reaktietijd, reageren met roerkorrekties. Mede door de grote traagheid van een schip zal dit resulteren in een voortdurend schommelende beweging van het schip rondom de kanaalas, waarbij de stuurman voortdurend moet korrigeren. Tijdens het varen zullen zowel de drifthoek β (de hoek die de lengteas van het schip maakt met de kanaalas, zie figuur 4.8) als de roerhoek δ_r van het schip voortdurend wisselen.

De vaarstrookbreedte, dat is de breedte waarbinnen het schip zich beweegt, wordt mede door de lengte van het schip zelf bepaald. Aangezien er echter een min of meer konstante verhouding tussen de lengte en de breedte van binnenschepen bestaat ($l/b = 6 \text{ à } 8$), kan het breedtebeslag, wat onderdeel uitmaakt van de vaarstrookbreedte, worden uitgedrukt in de breedte van het schip.

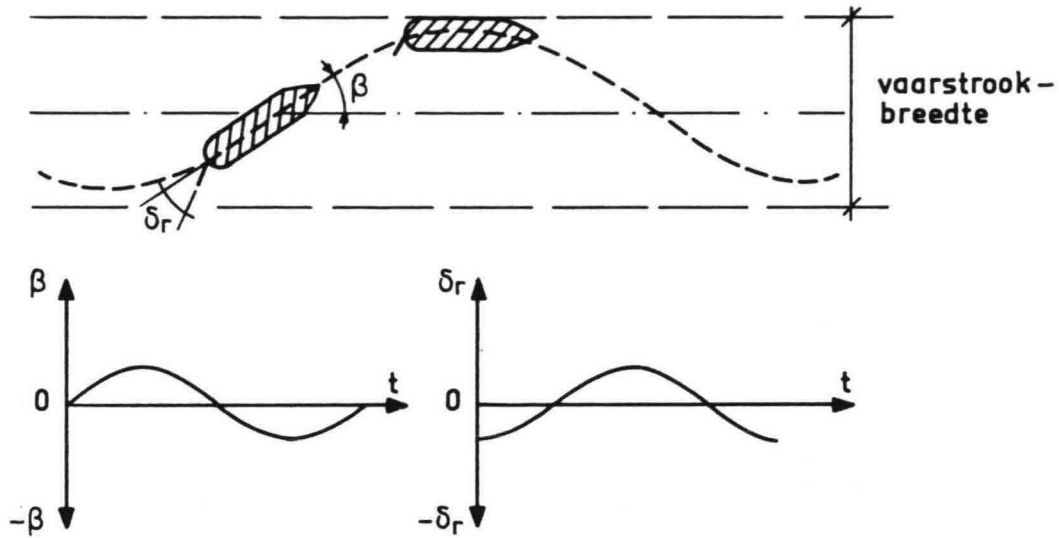
Het **grootste momentane breedtebeslag** ($\Delta B'$) wordt gevonden indien de drifthoek het grootst is (zie figuur 4.9). Er geldt dan een padbreedte (breedtebeslag) van:

$$\Delta B' = b \cdot \left\{ (1/b) \cdot \sin \hat{\beta} + \cos \hat{\beta} \right\} \quad (98)$$

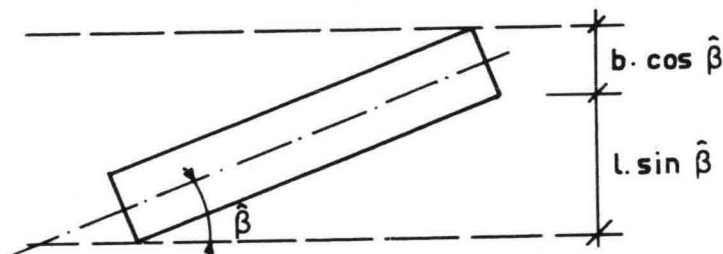
De **benodigde vaarstrookbreedte** blijkt gelijk te zijn aan:

- circa 1,10 à 1,20 maal de scheepsbreedte voor binnenschepen, en
- circa 1,30 à 1,45 maal de scheepsbreedte voor zeeschepen.

Voor kleine h_0/d -verhoudingen ($\leq 1,3$) zullen de benodigde vaarstrookbreedten sterk toenemen in verband met de grotere onbestuurbaarheid.



Figuur 4.8. Vaarstrookbreedte in samenhang met drift- en roerhoek



Figuur 4.9. Grootste momentane breedtebeslag

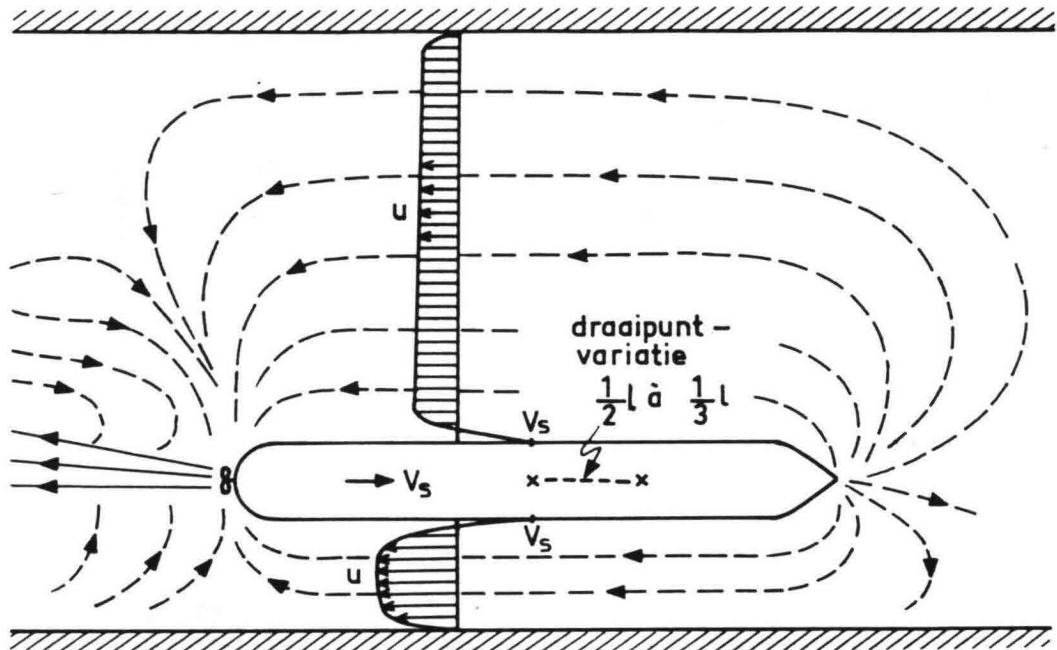
b. Scheepvaart buiten de as van het kanaal

Indien een schip vaart in de as van een kanaal met een symmetrisch dwarsprofiel, dan treedt aan beide zijden van het schip een even grote spiegel-daling op. Hierdoor zullen de krachten welke op het schip werken ook symmetrisch verlopen, waardoor zich voor de vaart geen moeilijkheden voordoen. Dit wordt geheel anders wanneer het schip buiten de as gaat varen. Dit doet zich, zoals reeds eerder besproken, voor als er met andere schepen een **ontmoeting** of **inhaalmanoeuvre** plaatsvindt, en verder bijvoorbeeld bij het passeren van een asymmetrisch in het kanaalprofiel gelegen brugopening.

Vaart het schip niet in de kanaalas, dan zal ten gevolge van het asymmetrische retourstroombeeld en de daardoor ontstane verschillen in spiegel-daling aan weerszijden van het schip een resulterende hydrostatische kracht F worden uitgeoefend, welke achter het draaipunt van het schip aangrijpt en gericht is naar de dichtstbijzijnde oever. Tussen het schip

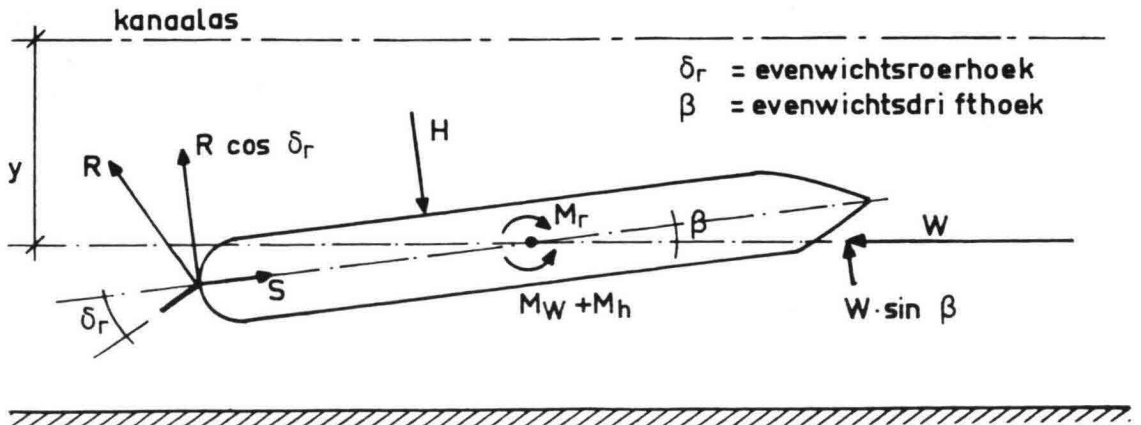
en de nabije oever is een kleiner doorstromingsprofiel aanwezig, zodat de snelheid en daardoor ook de spiegeldaling daar groter wordt (zie figuur 4.10).

Wanneer het schip zeer langzaam vaart dan bevindt het zogenaamde "taktische draaipunt" zich op $0,5.l$ vanaf de boeg (dus in het zwaartepunt van het schip), maar naarmate het schip sneller gaat varen zal deze afstand afnemen tot ca. $0,33.l$ vanaf de boeg.



Figuur 4.10. Stroombeeld rondom een buiten de kanaalas varende schip

De grootte van de zijdelingse hydrostatische kracht H (loodrecht op het schip) is sterk afhankelijk van de afstand y van het schip tot de kanaal-as, de snelheid van het schip, de blokkagefactor, en de waterdiepte onder de kiel. Ten opzichte van het zwaartepunt geeft deze dwarskracht H een moment M_h . Alleen met behulp van het roer kan op deze kracht worden gereageerd. De roerkracht, die variabel is door wijzigingen van de roeruitslag en de eventuele wijziging van het aantal omwentelingen van de schroef, is evenwel plaatsvast. De component van de roerkracht loodrecht op de as van het schip is $R \cdot \cos \delta_r$, en het moment dat hierdoor ontstaat is M_r (zie figuur 4.11).



Figuur 4.11. Krachtenspel

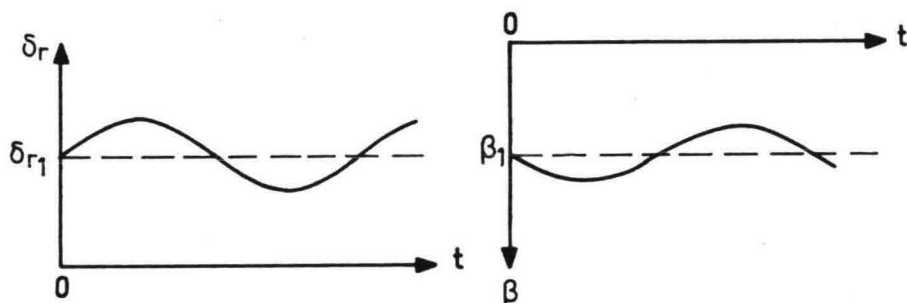
Door het plaatsvast zijn van het roer en de schroef is het niet mogelijk om met het roer zowel dwarskracht als moment tegelijk op te heffen. Wordt echter door het schip een naar de kanaalas gerichte drifthoek β ingenomen, dan zal de resulterende zijwaarts gerichte hydrostatische kracht H zich verder van het zwaartepunt af naar achteren verplaatsen en in grootte toenemen in verband met het kuiltrekken van de schroef nabij de oever. Door deze drifthoek ontstaat echter een komponent $W \cdot \sin \beta$ ten gevolge van de weerstand W die het schip ondervindt, alsmede een moment M_w . Deze twee leveren nu de ontbrekende termen voor het evenwicht. Het evenwicht wordt dus bepaald door:

$$H - W \cdot \sin \beta - R \cdot \cos \delta_r = 0 \quad (99)$$

$$M_h + M_w - M_r = 0 \quad (100)$$

Hieruit blijkt dus, dat als H toeneemt ook δ_r en β toenemen. Als tenslotte de maximum roeruitslag is bereikt, dan is bij verder toenemende H het evenwicht niet meer te verzekeren, waardoor het schip uit het roer loopt.

Het beschreven evenwicht is labiel en elke verstoring wordt meteen versterkt. De roerganger corrigeert met het roer de beweging van het schip en tracht de evenwichtstoestand terug te vinden. De verschijnselen zijn nu dynamisch geworden en de wijze van sturen van de roerganger is bepalend voor het gedrag van het schip. Het schip schommelt voortdurend om een gemiddelde evenwichtsdrifthoek β_1 (zie figuur 4.12).



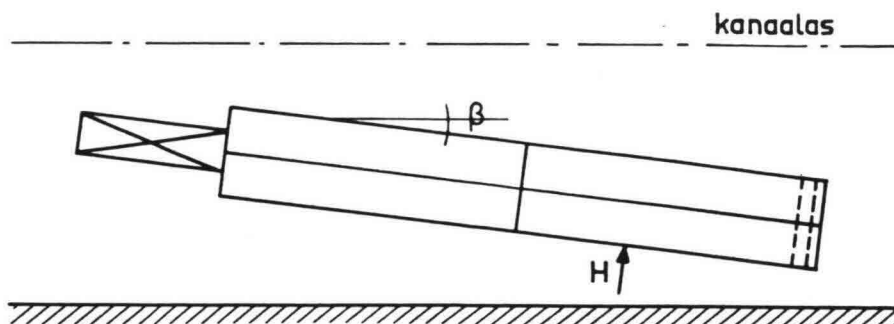
Figuur 4.12. Roerhoek en drifthoek bij het varen buiten de kanaalas

Hierdoor zal het schip een grotere vaarstrookbreedte nodig hebben in vergelijking met de toestand waarbij het schip in de as van het kanaal vaart. De vaarstrookbreedte bedraagt nu:

- voor binnenschepen: circa 1,2 à 1,4 maal de scheepsbreedte, en
- voor zeeschepen : circa 1,5 à 1,8 maal de scheepsbreedte.

Bij een duwkonvooi dat buiten de kanaalas vaart kan afhankelijk van de waterdiepte een geheel andere situatie ontstaan. Dit komt door de vorm van de onderwaterboeg. Deze is, in tegenstelling tot de vrij spitse min of meer naar benedenlopende vorm bij normale schepen, bij duwbakken in horizontale zin stomp en alleen in verticale zin gebogen. Het door het varende konvooi verdrongen water verdeelt zich volgens de weg van de minste weerstand, hetgeen betekent dat bij niet te diep water het meeste water schuin onder de bak doorgaat in de richting van de kanaalas. Hierdoor zal de waterstand over het voorste deel, direkt naast het konvooi aan de oeverzijde, hoger worden dan aan de zijde van de kanaalas. Om het wegdrukken ten gevolge van dit verschil te voorkomen moet worden bijgestuurd. De

positie, tijdens het varen buiten de as van het kanaal, zal daardoor (zonder tegenroer) tegengesteld zijn aan die van de normale schepen (zie figuur 4.13).

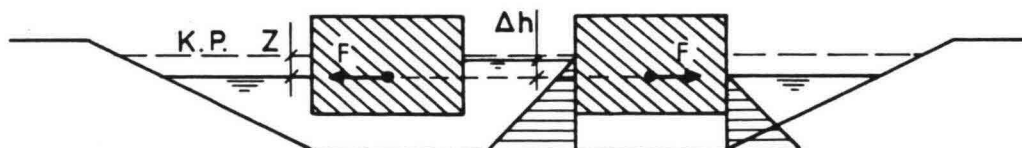


Figuur 4.13. Duwkonvooi buiten de kanaalas

Deze krabsgewijze vaarrichting neemt af naarmate het water gemakkelijker terugstroomt. Bij een duwkonvooi zal dit het geval zijn indien de kanaaldiepte groter wordt genomen. Dit is uit modelproeven duidelijk vast komen te staan. Uit deze proeven kwam tevens naar voren, dat bij een kanaaldiepte van 6,50 m (dit is dus iets meer dan twee maal de scheepsdiepte) het duwkonvooi zich weer als een konventioneel schip gaat gedragen. Deze diepte komt echter op kanalen maar sporadisch voor.

c. Ontmoetingen van twee schepen

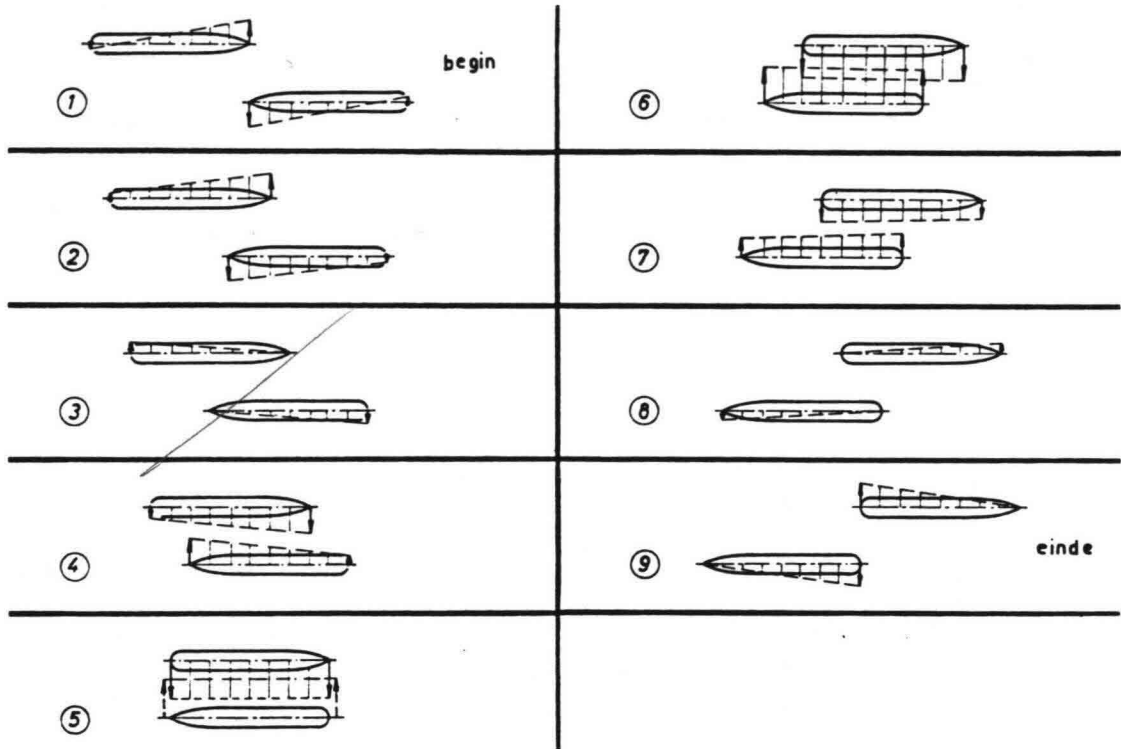
Twee elkaar ontmoetende schepen veroorzaken tegengestelde retourstromen die voor wat betreft het gebied tussen beide schepen op een gegeven moment elkaar geheel of gedeeltelijk opheffen, waardoor de waterspiegel tussen de beide schepen minder diep zal dalen dan tussen elk der schepen en hun nabije oevers (zie figuur 4.14). De schepen worden door het verschil in hydrostatische druk uiteengedreven. De mate waarin dit gebeurt is uiteraard afhankelijk van de afstand tussen de vaarbanen van beide schepen.



Figuur 4.14. Hydrostatische druk bij een ontmoeting van twee schepen

Vóór de ontmoeting worden de schepen uit de as van het kanaal gestuurd en naderen elkaar onder een koers, die nog enigszins naar de stuurboordoever is gericht. Eén à twee scheepslengten voor de ontmoeting sturen de schepen nog recht op elkaar aan. Indien de boegen in elkaars invloedssfeer komen, worden de schepen ten gevolge van de beide boeggolven uiteengedrukt. Bij de achtersteven bevindt zich ten gevolge van de schroefwerking een kuil (maximale spiegel daling), waardoor in een volgende fase de boegen door de wederzijdse achterschepen worden aangetrokken. Naarmate de schepen meer naast elkaar komen, stoten ze elkaar af door de eerdergenoemde invloed van elkaars spiegel dalingengebieden. In de laatste fase van de ontmoeting worden de schepen ten gevolge van o.a. de haalgolven uiteengedrukt en krijgen een draaiing van de oever af welke wordt tegengewerkt door de oeverzuiging.

In figuur 4.15 is het krachtenverloop voor de diverse fasen weergegeven. Hier is de ontmoeting van twee schepen die beide bakboordswal aanhouden weergegeven; deze situatie doet zich wel voor op rivieren (het voeren van het zogenaamde "blauwe bord"), waarbij de afvaart in principe de buitenbocht en de opvaart de binnenbocht wil varen in verband met het verschil in vaardiepte en stroomsnelheid.



Figuur 4.15. Diverse fasen bij een ontmoeting van twee schepen

Hierbij dient nog vermeld dat:

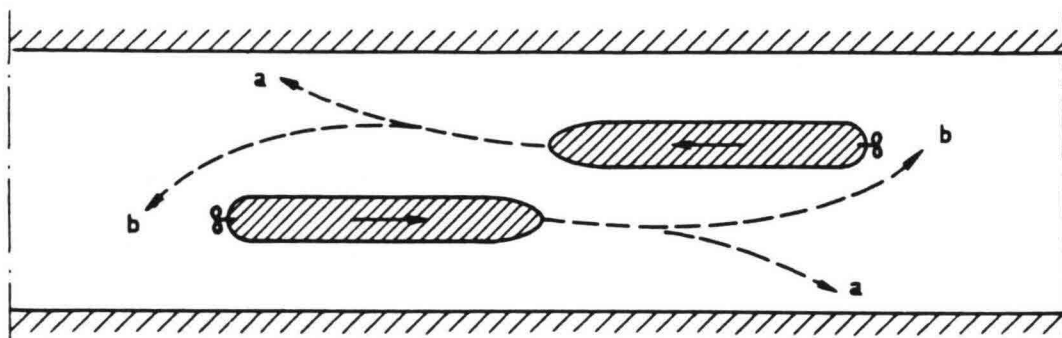
1. Het kleinste van de twee elkaar ontmoetende schepen het meest in snelheid zal afnemen aangezien (voor hem) de profielvernauwing ten gevolge van het grootspant van het grootste schip met bijbehorende spiegeladaling relatief het grootste is.
2. Vlak voor de ontmoeting het aantal omwentelingen van de schroef tijdelijk zal worden verminderd om tijdens de passage voldoende vermogen over te hebben in geval van moeilijkheden bij de besturing.
3. Naast de wederzijdse beïnvloeding van de schepen ook de zuiging van de oevers een aanzienlijke rol speelt; dit geldt speciaal voor coasters, vanwege de afwijkende (lage) l/b-verhouding, de aanwezigheid van kimkielen en het relatief kleine roeroppervlak.

Een oplossing ter vergroting van de bestuurbaarheid in dergelijke situaties is het zogenaamde pulserend varen. Dit is het varen met variatie in het motorvermogen zonder dat de vaarsnelheid toeneemt. Hierdoor houdt men meer druk op het roer.

De oeverzuiging geldt speciaal bij duwkonvoeien, omdat deze reeds met hun boeg naar de oever liggen tijdens het varen buiten de kanaalas en eveneens omdat door hun grotere breedte de oeverzuiging groter zal zijn. Tijdens de ontmoeting met andere schepen lopen deze konvoeien dan ook het gevaar voor het zogenaamde in "de wal" lopen. Daar komt nog bij, dat duwkonvoeien door hun grote afmetingen met de daarmee samenhangende massa-traagheid minder

goed manoeuvreerbaar zijn dan de konventionele vaartuigen. Dit wordt nog versterkt indien een leeg konvooi aan sterke zijwind bloot staat.

Bij de ontmoeting van twee schepen blijken er dus twee gevaarlijke situaties op te treden (zie figuur 4.16). Op het moment dat beide boegen in elkaars invloedssfeer komen bestaat er de mogelijkheid dat de schepen in de oevers lopen (zie a). Indien ter voorkoming hiervan teveel roer wordt gegeven, dan ontstaat de mogelijkheid dat achterop varende schepen worden aangevaren (zie b).



Figuur 4.16. Gevaarlijke situaties bij een ontmoeting

d. Inhaalmanoeuvre van twee schepen

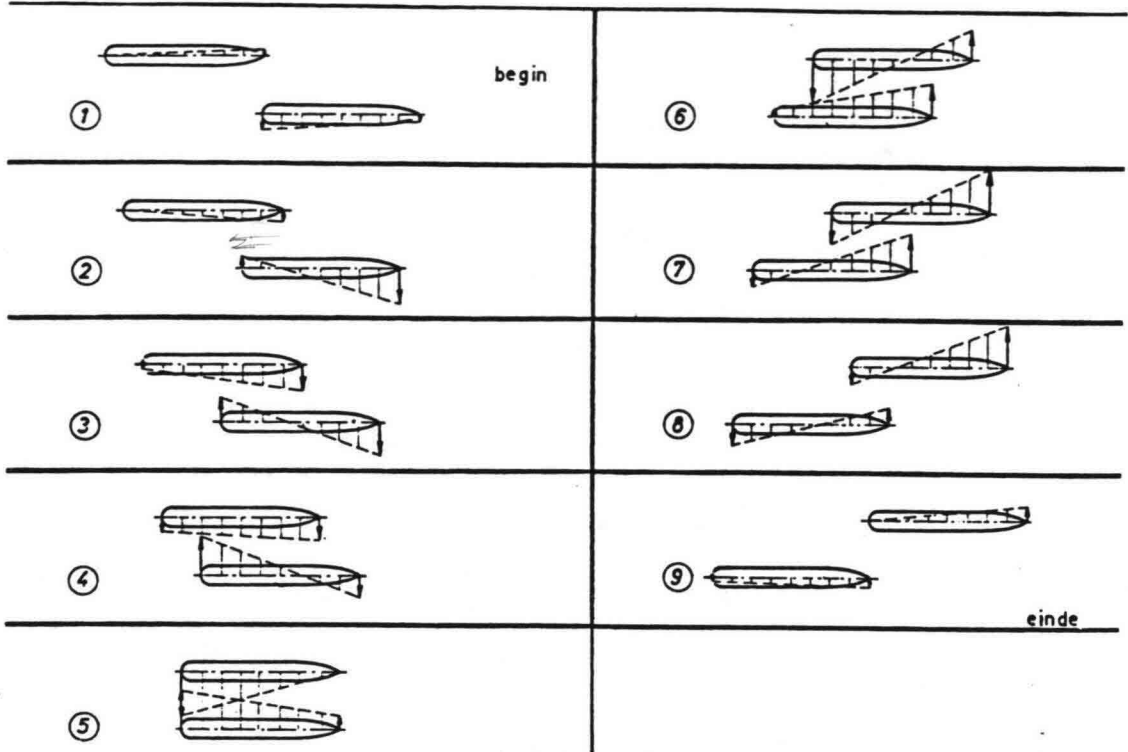
In tegenstelling tot een ontmoeting van twee schepen zullen bij het oplopen de retourstroom en de spiegeldaling van beide schepen, in het bijzonder tussen beide schepen in, elkaar versterken. De schepen ondervinden hierdoor meer weerstand (zie paragraaf 3.2.7) en worden naarmate de schepen meer naast elkaar komen door het verschil in hydrostatische druk naar elkaar toegedreven (zie figuur 4.17).



Figuur 4.17. Hydrostatische druk bij een inhaalmanoeuvre

Op het moment dat de inhaalmanoeuvre begint wordt de boeg van het oplopende schip aangetrokken door het achterschip van de opgelopen. Daarna glijdt het schip in het spiegeldalingsgebied dat bij de opgelopen hoort en wordt er naar toegezogen. Wanneer de oploper zich nog maar voor een deel in de spiegeldaling van de opgelopen, bevindt, is de watersnelheid (ten opzichte van het schip) bij de boeg veel groter ten gevolge van de extra retourstroom, dan bij het achterschip, zodat een geringe afwijking van het schip ten opzichte van de stroomlijnen reeds een sterk moment veroorzaakt. Dit is niet te voorkomen omdat het stroombeeld tijdens de inhaalmanoeuvre voortdurend verandert. Als de beide schepen precies naast elkaar liggen, worden ze volgens figuur 4.17 naar elkaar gedrukt. Beide schepen trachten daarom vrij van elkaar te sturen, maar komen daarbij mogelijk weer onder invloed van de oeverzuiging, sturen dan vervolgens weer vrij van de oever en komen daarbij weer onder elkaars invloed, enz. In de laatste fase moet de oploper uit de spiegeldaling van de ander "klimmen". Hier ontstaat dezelfde situatie als in het begin, met als enig verschil dat deze fase veel meer tijd kost (zie figuur 4.18).

Het kan onder verschillende omstandigheden onmogelijk zijn om de manoeuvre te voltooien, omdat bijvoorbeeld het motorvermogen van de oploper onvoldoende is om de extra weerstand te overwinnen (zie paragraaf 3.2.7).



Figuur 4.18. Diverse fasen tijdens een inhaalmanoeuvre van twee schepen

Het is duidelijk dat het sturen bij oplopen geheel iets anders is, dan bij een ontmoeting. Waren daar de optredende krachten en momenten de roerganger in wezen nog behulpzaam, nu moet hij met grote oplettendheid sturen om niet op een gegeven ogenblik de controle over zijn schip te verliezen. Het kan gebeuren, dat beide schepen tegen elkaar worden gezogen. Zij vormen dan als het ware één schip. Zo'n combinatie loopt onherroepelijk uit het roer.



Figuur 4.19. Inhaalmanoeuvre op het Maas-Waalkanaal

Het oplopen kan, mits de opgelopen zijn snelheid sterk vermindert en de oploper met aangepaste snelheid vaart zodat hij de ander niet meezuigt, tot een goed einde worden gebracht. Het inhalen is praktisch gezien alleen goed mogelijk indien het snelheidsverschil tussen beide schepen groter is dan 5 km/h. Het verminderen van de vaarsnelheid van de opgelopen moet echter met veel overleg gebeuren, wil de druk op zijn roer niet geheel wegvallen.

Zoals uit het voorgaande blijkt zullen bij iedere oploopmanoeuvre risico's aanvaard moeten worden, welke nauw samenhangen met de aanwezige manoeuvreerruimte (kanaalbreedte) op het kanaal.

e. Veiligheidsstroken

Voor de veiligheid om aanvaringen tussen schepen onderling en tussen schip en wal te voorkomen dienen bepaalde marges in de vorm van veiligheidsstroken te worden toegepast.

De veiligheidsstrook **tussen twee vaarstroken** wordt, zoals uit het voorgaande reeds duidelijk naar voren is gekomen, in hoofdzaak bepaald door de situatie met twee elkaar oplopende schepen. Hiervoor wordt veelal aangehouden:

- 0,20 à 0,40 maal de scheepsbreedte voor binnenscheepvaartkanalen, en
- 0,50 à 1,00 maal de scheepsbreedte voor zeescheepvaartkanalen.

Voor het oplopen **zonder snelheidsvermindering** wordt wel aangenomen dat minimaal een afstand van 2 à 4 maal de scheepsbreedte tussen de schepen nodig is.

De veiligheidsstrook **tussen een vaarstrook en de vaarwegbegrenzing** wordt, zoals al eerder vermeld, voornamelijk bepaald door de ontmoeting van twee schepen in het kanaal. Deze zal dan meestal groter genomen worden dan de veiligheidsstrook tussen twee vaarstroken onderling, omdat bij deze laatste situatie de kans, dat twee elkaar passerende schepen zich gelijktijdig aan de kanaalzijde van de vaarstrook bevinden, erg klein is. De kans op het in de oever lopen is, los gezien van de optredende oeverzuiging, tevens groter dan de kans op aanvaring tussen twee schepen, omdat in het eerste geval slechts één schipper kan reageren en in het tweede geval twee schippers met elkaar kunnen reageren.

Meestal wordt voor deze veiligheidsstrook aangehouden:

- 0,20 à 0,60 maal de scheepsbreedte voor binnenscheepvaartkanalen, en
- 0,75 à 1,25 maal de scheepsbreedte voor zeescheepvaartkanalen.

De toe te passen waarden hangen ook hier weer sterk samen met de toegepaste h_o/d_m -verhouding in verband met de bestuurbaarheid, dit in combinatie met de toegestane vaarsnelheid.

Voor een tweestrooksvaarweg zullen de maatgevende veiligheidsstroken voor oplopen en ontmoetingen nooit **gelijktijdig** nodig zijn. Het economisch optimum binnen de gegeven marges voor de te kiezen vaarwegbreedte op kielvlak (B_d), zijnde de benodigde vaarstrookbreedten vermeerderd met de veiligheidsstroken, hangt sterk af van onder andere:

- de te verwachten verkeersintensiteit,
- de lengte van de kanaalpanden (indien kort dan geen oplopen), en
- de kosten van de extra investeringen per breedte-eenheid.

Vooraf het laatste punt verschilt sterk van geval tot geval (aanwezigheid van bebouwing, industriegebied enz.), zodat het niet mogelijk is om hierover algemene uitspraken te doen. Per geval zal een economische optimalisatie uitgevoerd moeten worden, waarbij de extra investeringskosten voor een breder kanaal afgewogen dienen te worden tegen de gekapitaliseerde

transportkostenvoordelen ten gevolge van de grotere vaarwegbreedte (sneller varen, vlotter ontmoeten en betere mogelijkheden voor oplopen enz.).

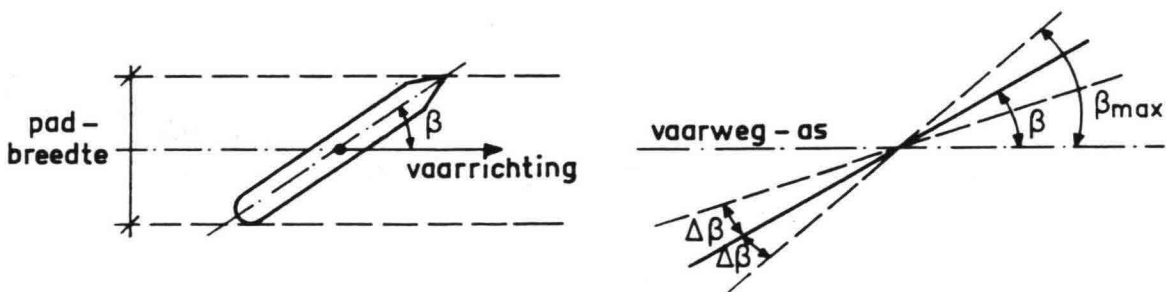
Uit een inventarisatie en literatuurstudie betreffende de normen voor B_d/b blijkt een absoluut minimum voor rechte kanalen, waarbij heel voorzichtig ontmoeten nog net mogelijk is, een $B_d/b = 2,8$ te zijn. De aanbevelingen in de literatuur voor verkeerssituaties voor tweestrooksvaarwegen waarbij een "normaal" profiel wordt toegepast lopen uiteen van $3,6 < B_d/b < 4,4$. Veel recent aangelegde klasse IV kanalen in Duitsland zijn gedimensioneerd uitgaande van de norm $B_d/b = 4,0$. Voor vaarwegen met éénstrooks verkeer worden B_d/b -waarden gevonden tussen 1,5 en 2,0.

Resumerend kan gesteld worden dat voor de kleinere klasse I t/m IV vaarwegen de volgende waarden door de commissie Vaarweg beheerders worden aanbevolen:

- éénstrooks verkeer : $B_d/b = 2,0$
- tweestrooks verkeer, krap profiel : $B_d/b = 3,0$
- tweestrooks verkeer, normaal profiel : $B_d/b = 4,0$

Voor de grotere klasse vaarwegen (V t/m VII) wordt een B_d/b -norm van 4,0 voor tweestrooks vaarwegen als ondergrens beschouwd, dus $B_d/b > 4,0$.

Speciaal in vlakke kustgebieden kan ten gevolge van veelvuldig optredende harde wind, vooral indien deze loodrecht op het kanaal werkt, een behoorlijke zijwindhinder ontstaan. Hiervoor is afhankelijk van de vorm van het dwarsprofiel een extra drifthoek nodig om door het kanaal te kunnen varen. Dit geldt speciaal voor hoog liggende ongeladen schepen. Door het optreden van windvlagen schommelt de drifthoek van het schip rondom een gemiddelde drifthoek β_w (zie figuur 4.20), waardoor een extra breedte-toeslag voor B_d wordt vereist.



Figuur 4.20. Drifthoek ten gevolge van zijwind

Uit metingen naar zijwindhinder op het Noordhollands Kanaal en het Balgzandkanaal bij zijwind van 7 à 8 Beaufort is voor de breedte-toeslag van een leeg schip het volgende verband gevonden tussen de drifthoek en de verhouding tussen de component van de windsnelheid loodrecht op de kanaal-oever (W_{\perp}) en de vaarsnelheid (V_s):

$$\beta_w = 0,45 \cdot \{W_{\perp}/V_s\}^2 \quad (^\circ) \quad (101)$$

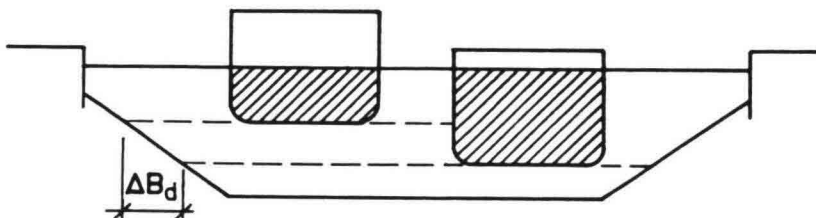
In diverse onderzoeksinstituten wordt momenteel in samenwerking met Rijks-waterstaat onderzoek verricht naar de algemene geldigheid van deze formule.

Uitgaande van de vergelijking (101) blijkt, dat de drifthoek beperkt kan worden door sneller te gaan varen, hetgeen in de praktijk ook veelvuldig voorkomt. Bij zeer sterke wind zullen ongeladen schepen soms genoodzaakt worden om tijdelijk met varen te stoppen. Soms neemt men water in als ballast of men laat ook wel een anker bij de boeg door het water slepen om zodoende de drifthoek te verkleinen.

Uit vaarsnelheidsmetingen op het kanaal Wessen-Nederweert bleek de vaarsnelheid van ongeladen schepen met een gemiddelde diepgang van 0,60 à 0,80 m te variëren tussen 3,0 en 3,4 m/s voor een krap profiel en tussen 3,6 en 3,9 m/s voor een normaal profiel. Voor eenstrooks verkeer wordt wel 3,0 m/s aangehouden. Deze snelheden liggen hoger dan de als regel door de beheerder toegestane vaarsnelheid (zie paragraaf 2.7.6).

Verder wordt voor de berekening van de breedte-toeslag ten gevolge van zijwind uitgegaan van de volgende veronderstellingen:

- Ontmoetingen van **twee ongeladen schepen** zullen, zeker op de kleinere vaarwegen waarbij meestal in één richting wordt gevaren, nauwelijks voorkomen.
- Oploopmanoeuvres van **twee ongeladen schepen** zullen ten gevolge van de kleine onderlinge snelheidsverschillen niet voorkomen.
- Bij het trapeziumvormige en het gebroken profiel hebben ongeladen schepen een grotere bevaarbare vaarwegbreedte op kielvlakniveau tot hun beschikking dan geladen schepen (zie figuur 4.21), waardoor weinig of geen breedte-toeslag noodzakelijk is.

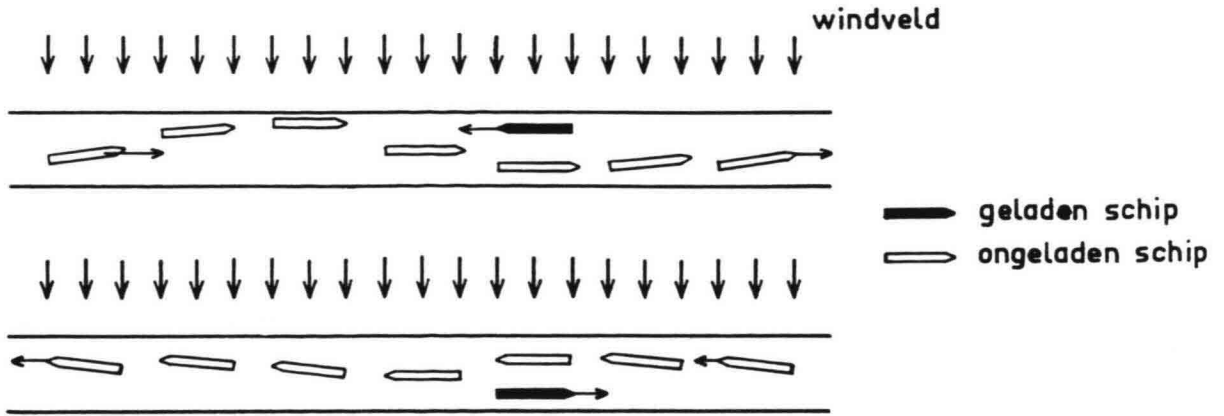


Figuur 4.21. Extra beschikbare vaarwegbreedte voor ongeladen schepen

- Bij oploop- zowel als bij ontmoetingsmanoeuvres van een ongeladen schip met een geladen schip bleek dat gedurende de manoeuvre zelf gerekend mag worden met de gemiddelde drifthoek β_w zoals in vergelijking (101) is weergegeven.

De ontmoetingsmanoeuvre gaat namelijk als volgt (zie figuur 4.22):

Indien bij een ontmoeting de afstand tussen de twee elkaar naderend schepen ongeveer 700 m bedraagt, stuurt het ongeladen schip eerst naar hogerwal. Daarna verkleint hij de drifthoek, waardoor het ongeladen schip verlijert (door de winddruk opzij geblazen wordt). Ter plaatse van de feitelijke ontmoeting is het ongeladen schip juist weer op zijn vaarweghelft aangekomen, maar met een zeer kleine drifthoek. Direkt na de ontmoeting stuurt het ongeladen schip weer sterk op naar hogerwal (zie figuur 4.22).



Figuur 4.22. Ontmoeting van een ongeladen en een geladen schip

Oploopmanoeuvres duren veel en veel langer dan ontmoetingen. Tijdelijke verkleining van de drifthoek is daardoor niet mogelijk. Voor het normale profiel geldt echter dat hierbij een dusdanig breedte aanwezig is, dat in geval van sterke zijwind (incidenteel) het geladen schip meer naar stuurboord kan uitwijken dan bij normale weersomstandigheden gebruikelijk is. De ruimte voor het snel varende ongeladen oplopende schip wordt daardoor vergroot, zeker als het geladen schip ook nog eens vaart vermindert waardoor de duur van de oploopmanoeuvre wordt verkort.

Voor de verschillende profielen kan nu globaal een netto breedte-toeslag, uitgedrukt in de scheepsbreedte, worden bepaald (zie tabel 4.7). Voor uitgebreidere informatie wordt verwezen naar [62]. Van geval tot geval zal deze breedte-toeslag, in verband met mogelijk aanwezige begroeiingen en bebouwing langs het kanaal, bepaald moeten worden.

profiel		kuststreek	landstreek
trapezium	normaal	0 à 0,40.b	0
	krap	0,25 à 0,75.b	0 à 0,15.b
gebroken	normaal	0 à 0,35.b	0
	krap	0,15 à 0,65.b	0 à 0,10.b
bak	normaal	0,60 à 1,00.b	0,25 à 0,45.b
	krap	0,75 à 1,20.b	0,30 à 0,60.b

Tabel 4.7. Netto breedte-toeslag door zijwind voor een tweestrooks vaarweg

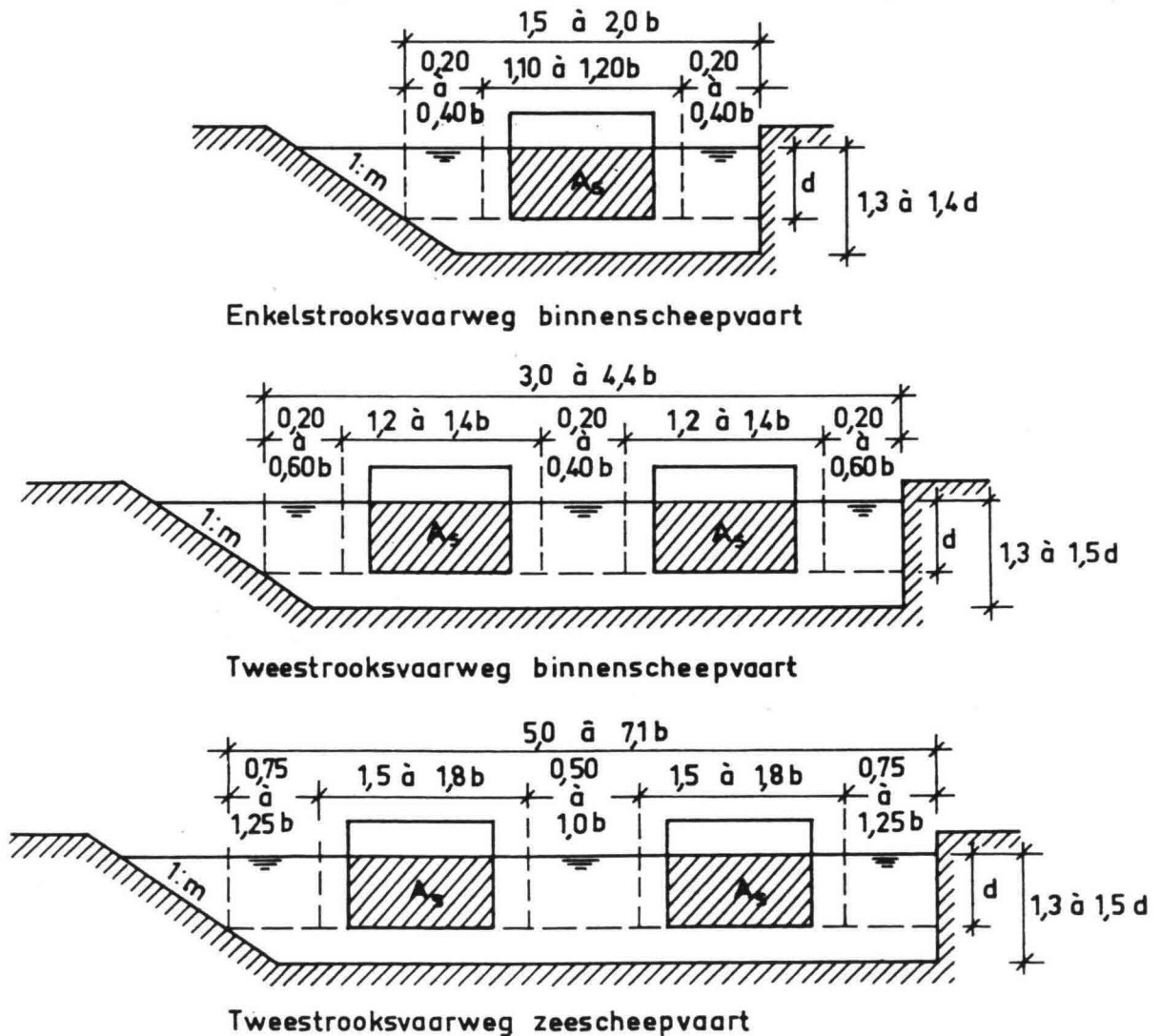
Uit dit overzicht blijkt, dat voor de landstreek praktisch geen toeslag nodig is voor het trapeziumvormig en het gebroken profiel in verband met de extra aanwezige breedte op het kielvlak (zie figuur 4.21). Het bakprofiel is hier dus duidelijk in het nadeel (mede gezien de golfhinder door reflecties) en zal extra verbreed moeten worden, zeker voor wat betreft het "krappe" profiel. Voor de kuststreek geldt dit laatste nog veel sterker. Het bakprofiel moet voor de veelal vlakke kuststreek dan ook zeker worden ontraden. Alleen indien bebouwing aanwezig is zal hieraan moeilijk zijn te

ontkomen, maar in dat geval geeft de bebouwing veelal weer een zekere beschutting.

4.2.5. Normen voor het vaarwegdwarsprofiel (A_s/A_c)

Uit de normen voor de vaarwegdiepte en de vaarwegbreedte zoals deze in de voorgaande paragrafen zijn behandeld, kunnen de gewenste normen voor de vaarwegdwarsprofielen worden afgeleid. Deze zijn in figuur 4.23, exclusief windtoeslag, weergegeven. Hierbij is ten aanzien van het benodigde dwarsprofiel voor **lange doorgaande** zeescheepvaartkanalen uitgegaan van de situatie dat de zeeschepen op eigen kracht (dus zonder sleepboothulp) het kanaal bevaren.

Uit figuur 4.23 blijkt ondermeer dat voor een trapeziumvormig en een gebroken profiel de genoemde normen voor de vaarwegbreedte gelden **op het kielvlak bij een stilliggend schip**. Zoals reeds in paragraaf 4.2.3 bij de diepte parameter naar voren is gekomen, zullen deze normen afnemen bij toename van de vaarsnelheid ten gevolge van de daardoor ontstane grotere inzinking (= waterspiegeldaling). Deze afname blijkt sterk afhankelijk van de toegepaste taludhelling (m) te zijn. Bij een taludhelling $1 : 4$ en bijvoorbeeld een waterspiegeldaling van $0,40$ m bedraagt de afname van de beschikbare breedte op het kielvlak: $m \times Z = 4 \times 0,40 = 1,60$ m.



Figuur 4.23. Normen voor het dwarsprofiel

De **blokkagefactor** k ($= 1/\{A_s/A_c\}$) is, naast de eerder genoemde diepteparameter, hoofdzakelijk van belang voor de **maximum vaarsnelheid** die op een vaarweg gehaald kan worden. De norm die aan de blokkagefactor wordt gesteld moet dus in de eerste plaats worden gezien als een vaarsnelheids-eis. Daarnaast is het een handig en veel gebruikt kengetal dat direkt een indruk geeft over de nautische kwaliteit van het gekozen dwarsprofiel.

Bij het bepalen van de normen ten aanzien van de vaarsnelheids is uitgegaan van de volgende definitie:

“ De maximum vaarsnelheid in het trapeziumvormig profiel wordt gedefinieerd als $0,9$ x de grenssnelheid volgens de methode Schijf. De gevonden maximum vaarsnelheid voor het trapeziumvormig profiel wordt vervolgens normatief gesteld voor de andere profielvormen.

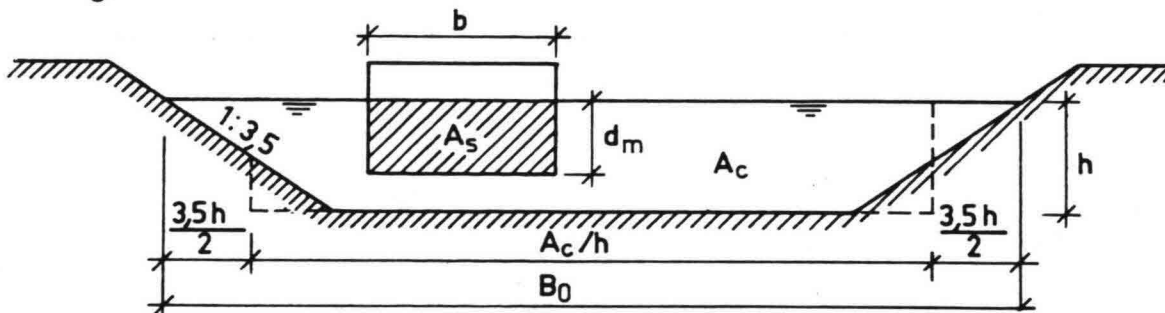
Verder worden op grond van inventarisatie en literatuuronderzoek voor het **trapeziumvormige profiel** de volgende blokkagefactoren normatief gesteld:

- Voor het "normale" profiel: $k = 7$ [$h_o/d_m = 1,4$ en $B_d/b \geq 4$]
- Voor het "krappe" profiel: $k = 5$ [$h_o/d_m = 1,3$ en $B_d/b \geq 3$]
- Voor de éénstrooks vaarweg: $k = 3,5$ [$h_o/d_m = 1,3$ en $B_d/b \geq 2$]

Bij een volgens de inventarisatie gemiddeld toegepaste taludhelling van $1 : 3,5$ voor een trapeziumvormig kanaalprofiel volgt (volgens figuur 4.24) voor de waterspiegelbreedte:

$$B_o = A_c/h_o + 3,5 \cdot h_o = k \cdot b / (h_o/d_m) + 3,5 \cdot (h_o/d_m) \cdot d_m \quad (102)$$

Gezien de afmetingen van het maatgevende schip (b , d_m) en de normen voor de vaarwegdiepte (h_o/d_m) en het vaarwegdwarsprofiel (k), ligt het trapeziumvormig dwarsprofiel dus vast, en daarmee de maximum snelheid van $0,9 \cdot v_{gr}$.



Figuur 4.24. Trapeziumvormig kanaalprofiel

- Voor het **normale trapeziumvormige profiel** (met $m = 3,5$) kunnen nu, uitgaande van een blokkagefactor van 7 en een diepteparameter van $1,4$, voor de diverse klassen vaarwegen de afmetingen worden bepaald. Voor de klassen I t/m IV lopen de maximale vaarsnelheden ($0,9 \cdot v_{gr}$) geleidelijk op van circa 9 km/h voor klasse I tot 10 km/h voor klasse IV. De daarbij behorende breedteparameters lopen op van circa $4,1$ tot circa $4,4$. Voor het **gebroken profiel** ($1,3 < a < 1,6$ m en talud $1 : 4$) en het **bakprofiel** geldt bij dezelfde vaarsnelheden per klasse een vrij konstante breedteparameter van $4,0$. Bij het gebroken profiel wordt daarbij een blokkagefactor gevonden van $k = 6,4$ en bij het bakprofiel van $k = 5,5$.
- Voor het **krappe trapeziumvormige profiel** kunnen eveneens, echter nu uitgaande van $k = 5$ en $h_o/d_m = 1,3$, de afmetingen van de vaarweg worden

bepaald. Voor de klassen I t/m IV lopen hierbij de maximale vaarsnelheden geleidelijk op van circa 7 km/h voor klasse I tot 8 km/h voor klasse IV. De daarbij behorende breedteparameter loopt op van circa 3,0 tot 4,3. Voor het gebroken profiel en het bakprofiel geldt ook hier een vrij konstante breedteparameter van circa 3,0. Bij het gebroken profiel wordt daarbij $k = 4,6$ à $4,9$ en voor het bakprofiel $k = 3,9$ à $4,0$ gevonden.

- Voor de **trapeziumvormige éénstrooks vaarweg** tenslotte kunnen, uitgaande van $k = 3,5$ en $h_o/d_m = 1,3$, de afmetingen op dezelfde manier worden gevonden. Voor de klassen I t/m IV lopen hierbij de maximale vaarsnelheden op van circa 5,5 tot 6 km/h. De daarbij behorende breedteparameteres zijn circa 2,0, wat ook geldt voor het gebroken profiel en het bakprofiel. Bij het gebroken profiel is dan $k = 3,3$ à $3,7$ en bij het bakprofiel is $k = 2,6$ à $2,7$.

Resumerend worden, zoals in [62] uitvoerig naar klasse-indeling en dergelijke is weergegeven, deze normen samengevat in tabel 4.8. Hierbij worden tevens de met Schijf bij $0,9.V_{gr}$ gevonden retourstroom en spiegeldaling vermeld.

profiel	$0,9.V_{gr}$ km/h	norm	trapezium	gebroken	bak
Normaal	9 à 10	h_o/d_m	1,4	1,4	1,4
		B_d/b	4,1 à 4,4	ca. 4,0	ca. 4,0
		k	7	6,3 à 6,5	5,5 à 5,6
Krap	7 à 8	h_o/d_m	1,3	1,3	1,3
		B_d/b	3,0 à 3,2	ca. 3,0	ca. 3,0
		k	5	4,6 à 4,9	3,9 à 4,0
Enkelstrooks	5,5 à 6	h_o/d_m	1,3	1,3	1,3
		B_d/b	ca. 2,0	ca. 2,0	ca. 2,0
		k	3,5	3,3 à 3,7	2,6 à 2,7
retourstroom		U (m/s)	0,8 à 1,0	0,9 à 1,2	1,0 à 1,4
spiegeldaling		Z (m/s)	0,2 à 0,3	0,25 à 0,35	0,3 à 0,4

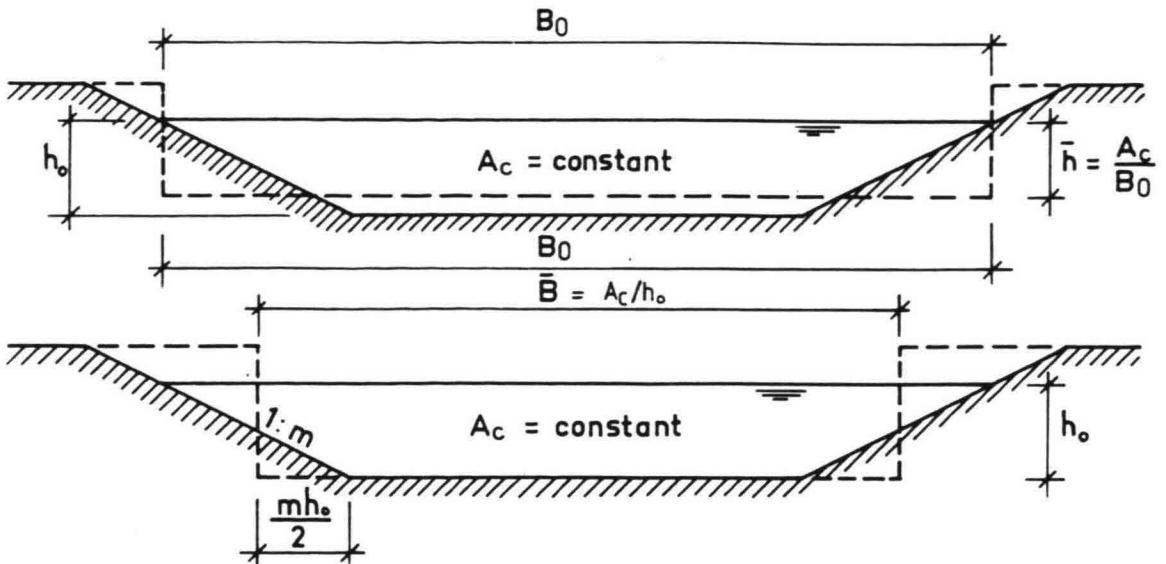
Tabel 4.8. Normen voor het vaarwegdwarsprofiel, klasse I t/m IV

Zoals blijkt uit deze tabel nemen bij gelijkblijvende vaarsnelheid de retourstroom en spiegeldaling toe bij toepassing van achtereenvolgens het trapezium, het gebroken en het bakprofiel, hetgeen niet alleen direct samenhangt met de afname van de blokkagefactor maar vooral door de beperking van de waterspiegelbreedte bij het ongestoorde waterstandsniveau.

Dit blijkt direct indien een vergelijking tussen een trapezium en een bakprofiel met een gelijkblijvende blokkagefactor wordt gemaakt (zie figuur 4.25). In het eerste geval zijn van beide de waterspiegelbreedten gelijk gehouden. Uit bijvoorbeeld vergelijking (9) is voor de grenssnelheid direct in te zien dat bij een gegeven blokkagefactor slechts één Fr-getal behoort (zie ook figuur 3.4), namelijk:

$$Fr = V_{gr}/\sqrt{g \cdot \bar{h}} = V_{gr}/\sqrt{g \cdot A_c/B_o} \quad (103)$$

Aangezien B_o voor beide profielen hetzelfde is zal dus ook de vaarsnelheid in beide gevallen hetzelfde zijn.



Figuur 4.25. Vergelijking trapeziumvormig profiel en bakprofiel

Voor het tweede geval is uitgaande van eenzelfde diepteparameter (h_0/d_m) de waterdiepte (h_0) in beide profielen hetzelfde genomen, hetgeen meer overeenstemt met de praktijk. Uit vergelijking (103) blijkt nu dat in het rechthoekige kanaal veel sneller gevaren kan worden dan in het trapeziumvormige kanaal en wel volgens:

$$V_{s_{\text{bak}}} = \frac{\sqrt{g \cdot h_0}}{\sqrt{g \cdot A_c / B_0}} \cdot V_{s_{\text{trap}}} = \{B_0 / \bar{B}\}^{0,5} \cdot V_{s_{\text{trap}}} \quad (104)$$

met $\bar{B} = A_c / h_0$

Ditzelfde effect speelt bij een plaatselijke vernauwing in een trapeziumvormig kanaal, gevormd door de verticale landhoofden van spoor- en verkeersbruggen. De grenssnelheid en daarmee ook elke andere vaarsnelheid is zelfs dan door deze beperking in de waterspiegelbreedte veelal groter dan in het kanaal zelf, ondanks het feit dat het beperkte doorstroomoppervlak tussen de landhoofden veelal kleiner is dan A_c .

In Europees verband zijn voor klasse IV vaarwegen, volgens de CEMT en ECE klassificatie, voor West Europa de volgende aanbevelingen gedaan:

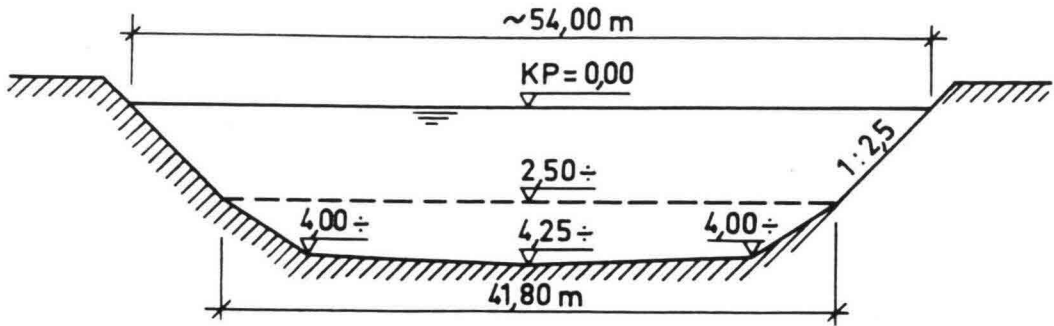
- Voor bestaande kanalen: $k > 5$ en $h_0/d_m \geq 1,4$
- Voor nieuwbouw kanalen: $k \geq 7$ en $h_0/d_m \geq 1,4$

Later is voor de West-Duitse kanalen (HAVA) voor klasse IV gesteld:

- Voor tweestrooks vaarwegen: $5 < k < 10$ en $h_0/d_m \geq 1,5$
- Voor driestrooks vaarwegen: $k > 9$ en $h_0/d_m \geq 1,5$

Hieruit valt op dat de normen voor een "normaal" trapezium profiel voor klasse I t/m IV vaarwegen in Nederland goed overeenkomen met de Europese aanbevelingen. Dit geldt in mindere mate voor het gebroken- en bakprofiel. Verder valt op dat in West-Duitsland de vergroting van de blokkagefactor vooral gezocht is in het toepassen van grotere waterdiepten, waardoor, zoals reeds eerder is aangetoond, de vaarsnelheid sterk kan toenemen.

In een Duitse bijdrage voor het Internationale Scheepvaartcongres te Stockholm 1965 wordt voor klasse IV vaarwegen een dwarsprofiel volgens figuur 4.26 voorgesteld. Hierbij is uitgegaan van een vaarsnelheid van 10 à 11 km/h, een blokkagefactor $k = 7$ en een breedte op KP - 2,5 m van 4,4 x 9,5 m = 41,8 m. De bijbehorende diepteparameter wordt hier zelfs: $h_0/d_m = 1,6$ à 1,7.

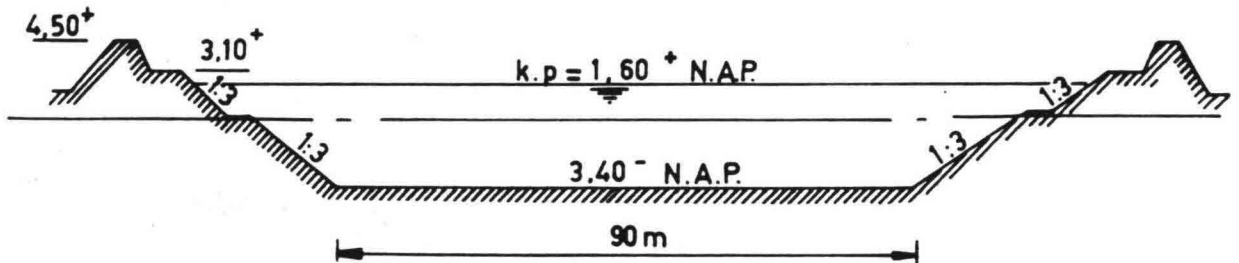


Figuur 4.26. Duits standaardprofiel klasse IV vaarweg

Bij aanwezigheid van duwvaart op de grotere klasse vaarwegen heeft men het dwarsprofiel voor de in Nederland aan te leggen kanalen gebaseerd op de volgende eisen:

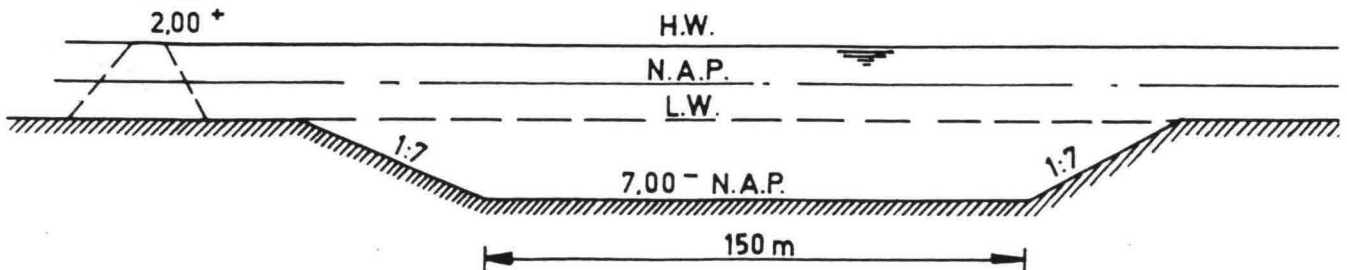
1. Twee duwkonvoeien van het toendertijd op de Rijn voorkomende grootste toegelaten type (185 x 22,4 x 3,2 m) moeten elkaar veilig en met onveranderde snelheid kunnen ontmoeten.
2. Er werd uitgegaan van drie vaarstroken, waarvan de eerste bestemd was voor het zojuist genoemde duwkonvooi, de tweede voor de toen nog aanwezige sleep bestaande uit twee sleepschepen van ongeveer 2000 ton (100 x 12 x 2,8 m) en een derde voor een motorschip van 1350 ton (80 x 9,5 x 2,5 m), dat verondersteld werd in tegengestelde richting te varen als de overige genoemde schepen.
3. Om economische redenen moet de snelheid van het duwkonvooi zo weinig mogelijk beperkt worden ($h_o/d_m \geq 1,5$).
4. Met uitzondering van punten waar een grote breedte niet dan met bijzonder hoge kosten is te realiseren, moeten een duwkonvooi en een sleep van de genoemde maximale afmetingen elkaar met normale snelheid kunnen passeren.

Aan de hand van deze eisen is men voor het Schelde-Rijnkanaal tot de in figuur 4.27 vermelde afmetingen gekomen.



Figuur 4.27. Schelde-Rijnkanaal

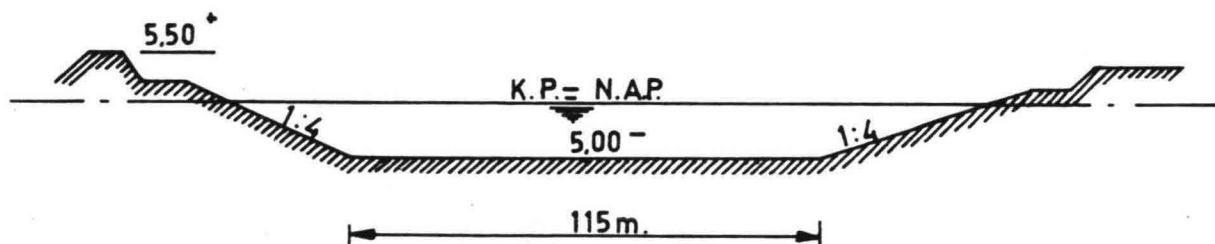
De traverse van het Schelde-Rijnkanaal door de Oosterschelde, waarbij uitgegaan werd van een tijdelijke getijbeweging, heeft een grotere bodembreedte (150 m) gekregen in verband met de te verwachten moeilijkheden bij het manoeuvreren van lege duwkonvoeien bij sterke westenwind (zie figuur 4.28).



Figuur 4.28. Traverse Schelde-Rijnkanaal door Oosterschelde

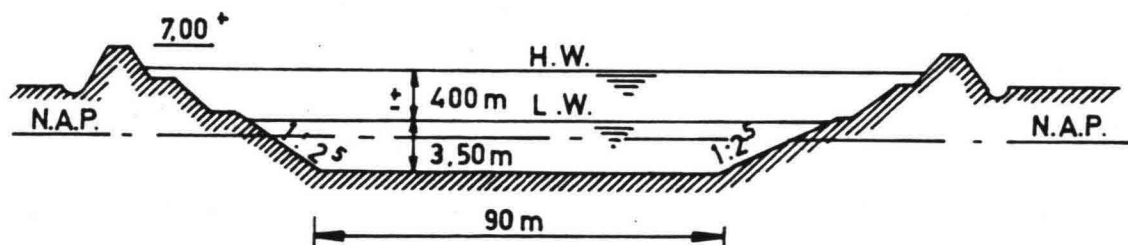
Bij het oorspronkelijke, door sluizen afgesloten Hartelkanaal heeft men in het westelijke gedeelte met langs het kanaal gelegen industrieën te maken. Hier zullen veelal binnenschepen afgemeerd liggen die een extra breedte vereisen. De oorspronkelijke bodembreedte van 90 m is daarom over een groot deel van de kanaallengte met 25 m verbreed tot 115 m (zie figuur 4.29).

In het kader van het Open-Hartelproject is, in verband met de aanwezigheid van de getijdebeweging, het kanaalpand tussen de Hartelmond en de Rozenburgsesluis verdiept tot NAP - 6,50 m, terwijl de rest van het kanaal, in verband met de vele aanwezige zinkers, op NAP - 5,50 m is gelegd. De grootste stroomsnelheden treden namelijk op in de mond van het Hartelkanaal: ca. 1,2 m/s bij gemiddeld getij, wat voor de scheepvaart en de stabiliteit van de bodem zeker niet gering is.



Figuur 4.29. Hartelkanaal

Bij de verruiming van het Amsterdam-Rijnkanaal heeft men, waar mogelijk, weer een bodembreedte van 90 m toegepast. De diepte is daarbij tevens op 5 m gesteld. Alleen waar deze breedte van 90 m niet mogelijk is in verband met aanliggende industrieën heeft men een bakprofiel gekozen (met breedte 100 m en diepte 6 m). In het Betuwepand van het verruimde Amsterdam-Rijnkanaal bedraagt bij open verbinding met de Waal de geringste vaardiepte bij laag water 3,5 m. De diepte op de Waal is dan echter zo klein dat de schepen zodanig zijn afgeladen dat ze zonder enige moeite op het kanaalpand kunnen varen (zie figuur 4.30).



Figuur 4.30. Amsterdam-Rijnkanaal

4.2.6. Diskontinuiteiten en andere nevenaspecten ten aanzien van het dwarsprofiel

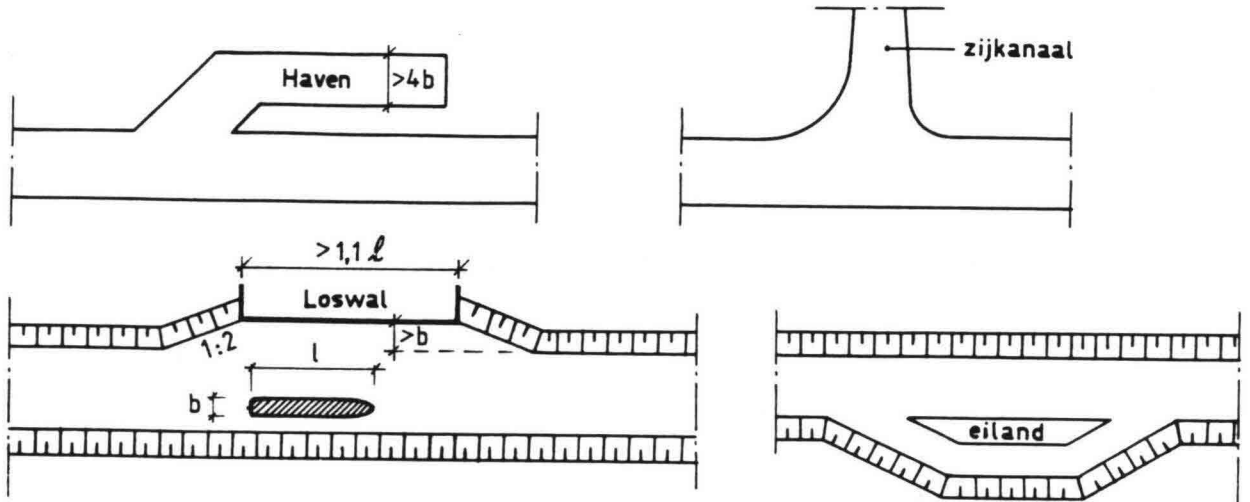
Storende invloeden voor de scheepvaart komen onder andere voor op plaatsen waar het dwarsprofiel plotseling verandert, of waar de stromingstoestand plotseling verandert. Dit doet zich voor bij:

- Profielverwijdingen
- Profielvernauwingen
- Dwarsstromen
- Langsstromen

In deze paragraaf zullen deze situaties achtereenvolgens worden toegelicht.

a. Profielverwijdingen

Hierbij wordt het kanaal plaatselijk verbreed. Dit treedt op bij haven-
ingangen, zijkanalen, terugliggende los- en laadplaatsen, zwaaigeleg-
heden en bij eilanden (bijvoorbeeld het munitie-eiland in het Noordzee-
kanaal). Zie figuur 4.31.

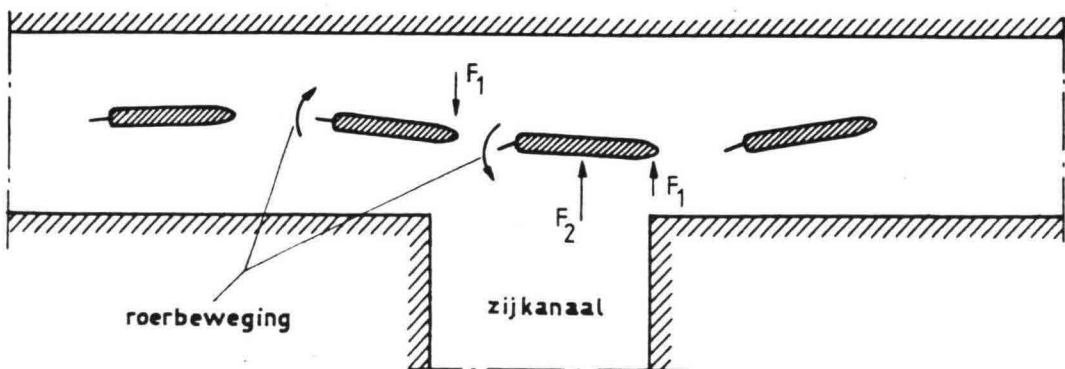


Figuur 4.31. Profielverwijdingen

Allereerst wordt hierbij voor beroepsvaartuigen als eis voor een minimum-
overzicht op het voorliggende vaarwater een zichtlengte van minimaal 4
maal de scheeps lengte gehanteerd. Dit in verband met de benodigde stop-
lengte van $4 \times l$, met verwaarlozing van de reaktietijd. Bij minder uit-
zicht zal de schipper namelijk zijn snelheid gaan minderen.
Voor pleziervaart moet de zichtlengte minstens 100 m bedragen.

Komt een schip ter plaatse van een verwijding aan, dan zal de stuwgolf-
grootte zich aan de zijde van de verwijding verkleinen. Hierdoor ontstaat
een drukvermindering tegen de boeg van het schip. Het zal daardoor de
neiging krijgen om ten gevolge van deze dwarskracht F_1 in de richting van
deze verwijding te gaan koersen.

Indien het schip iets verder is gevorderd, zal het een tegenkracht F_2
ondervinden, doordat de spiegel daling aan de zijde van de verwijding door
zijdelingse toestroming gedeeltelijk zal worden opgevuld. Het schip zal
zich nu van de verwijding af willen bewegen. Voor een zijkanaal is dit in
figuur 4.32 weergegeven.



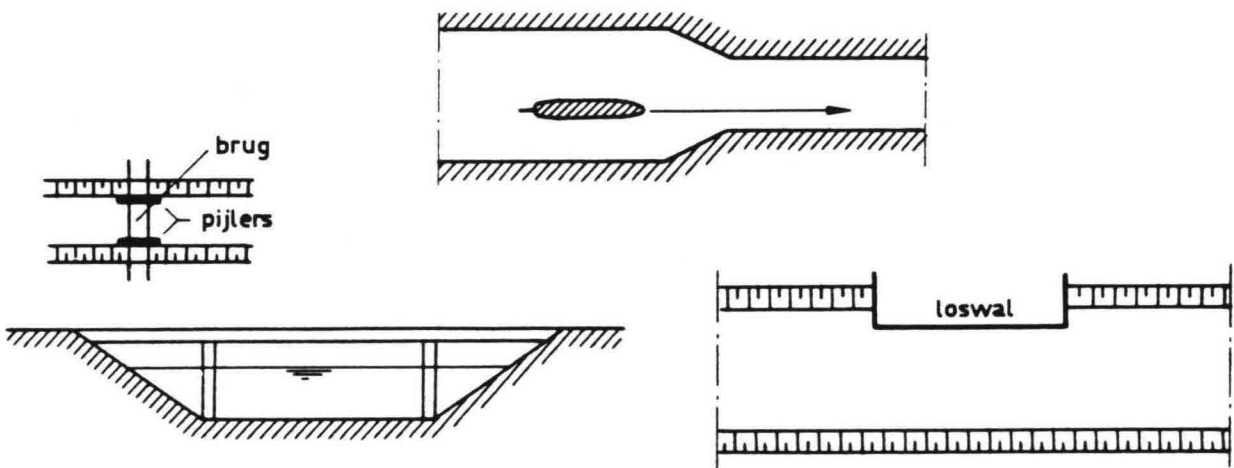
Figuur 4.32. Scheepspassage bij een zijkanaal

Indien de breedte van een zijkanaal in dezelfde orde van grootte als die van het kanaal zelf ligt, dan is dit goed merkbaar op de manoeuvre van het schip. Is de breedte van het zijkanaal een orde kleiner dan van het kanaal, dan is deze invloed van weinig betekenis. Wordt er uit het zijkanaal water op het kanaal geloosd, dan wordt de situatie nog ongunstiger.

Voor een profielverwijding bij **vaargeulen door meren**, als verlengde van een scheepvaartkanaal, ontbreekt de geleidende functie van de oever geheel, terwijl de windinvloed veelal groter wordt. De koerskorrekties worden bij de overgang in het algemeen te laat ingezet, waarbij grotere schommelingen rond een gemiddelde koershoek kunnen gaan optreden, zodat een bredere vaargeul vereist is. Een veel toegepaste vuistregel is, dat de bodembreedte van de vaargeul door meren circa 2 à 3 maal zo groot dient te zijn als de bodembreedte van de aansluitende kanaalvakken. De overgang in bodembreedte verloopt daarbij onder 1 : 20 en dient voor een deel, bijvoorbeeld voor de helft, reeds op het kanaalgedeelte zelf aan te vangen.

b. Profielvernauwingen

Hierbij wordt het kanaal versmald. Dit komt voor bij een verandering van de kanaaldoorsnede zoals bij binnen het kanaalprofiel gelegen loswallen en bij brugpijlers (zie figuur 4.33).



Figuur 4.33. Profielvernauwingen

Bij verandering van een breed in een smal kanaal zal een schip, dat buiten de as van het kanaal vaart, relatief verder uit de as komen te varen. Hierdoor zal een grotere oeverzuiging optreden, zeker indien deze overgang abrupt geschiedt. Verder zal dit een snelheidsvermindering van het schip teweeg brengen, waarbij translatiegolven worden opgewekt ter plaatse van de diskontinuiteit.

Ditzelfde zal het geval zijn bij een uitgebouwde loswal en het passeren van bruggen. Bij laaggelegen bruggen met een beweegbare opening zal het schip soms worden gedwongen om bij niet geopende brug te stoppen. Het schip zal hierbij trachten aan "hoger wal" te blijven (indien nodig met behulp van boegschroef of boeganker). Bij het op gang komen van het schip bij de geopende brug is het meestal niet eenvoudig om door de, veelal excentrisch gelegen, opening te varen. Dit vereist extra "drang op het roer" door het verhogen van het toerental van de schroef. Ook bij hooggelegen vaste bruggen zal een schip bij het passeren van de brugpijler extra roerkapaciteit ter beschikking houden in verband met de oeverzuiging. Om dit gedeelte te kunnen passeren zal hij een kleinere snelheid aanhouden,

om bij kritieke situaties door verhoging van het toerental van de schroef over extra roerdruk te kunnen beschikken. Teneinde bij bruggen met beperkte doorvaarthoogte bij het passeren van de brug een niet te grote retourstroom te krijgen zal men het dwarsprofiel zo min mogelijk verkleinen door toepassing van aanbruggen aan weerszijden van de scheepvaartopening. Een voorkeur verdient uiteraard een openingsbreedte die gelijk is aan de breedte op het kielvlak.

c. Dwarsstromen

Door het lozen van water op een scheepvaartkanaal, en ook enigermate bij het onttrekken van water, ontstaat een dwarsstroming die veel hinder voor de scheepvaart kan geven. Indien deze hinder te groot zou worden dient deze lozing of onttrekking over grotere kanaallengte verdeeld te worden, of gebroken en afgebogen te worden door stroombrekende konstrukties.

Een dwarsstroom op een vaarweg door lozen of onttrekken van water beïnvloedt de koerslijn van de passerende scheepvaart. De hinder van de dwarsstroom hangt samen met:

- De breedte waarover de dwarsstroom plaatsvindt ten opzichte van de lengte van het schip
- De gemiddelde stroomsnelheid over deze breedte
- De diepteligging van de uittredende c.q. instromende dwarsstroom ten opzichte van de breedte van de vaarweg
- Eén- of tweezijdige toe- of afvoer
- Afstand vaarbaan tot oeverlijn
- Snelheid van de schepen ten opzichte van de dwarsstroomsnelheid.

Rekening houdend met al deze factoren vraagt dit om een extra vaarwegbreedte over één of meer scheepslengten aan één zijde of aan weerszijden van de vaarweg.

Als algemeen voldoende veilig geachte richtlijn bij dwarsstromen **door lozen** geldt voor een vaarweg bestaande uit een "normaal" dwarsprofiel, zie [65]:

- Lozingsdebiet $< 5 \text{ m}^3/\text{s}$ (bij grotere debieten is laboratoriumonderzoek vereist)
- Dwarsstroomveldbreedte $< 0,5 \times$ de lengte van het schip
- Dwarsstroomsnelheid in de oeverlijn $< 0,3 \text{ m/s}$
- Pijpen in de oeverlijn met diameter $< 0,5 \text{ m}$ en uitstroomsnelheid $< 1,5 \text{ m/s}$.

Voor vaarwegen met "krappe" profielen dienen genoemde dwarsstroomsnelheden tot $2/3$ gereduceerd te worden, terwijl deze reductie $1/2$ wordt voor enkelstrooms vaarwegen.

Voor **wateronttrekking** uit een vaarweg is de hinder aanzienlijk minder, zodat hiervoor $1,5$ maal hogere waarden nog aanvaardbaar worden geacht.

d. Langsstromen

Op kanalen dienen langsstromen, voortvloeiend uit de waterbeheersings-eisen, gering te zijn zodat geen bijzondere voorrangregels nodig zijn ten aanzien van met de stroom meevarende schepen. Op de kleinere vaarwegen met een zeer belangrijke afstromingsfunctie kunnen in neerslagrijke gebieden tijdelijk soms grote stroomsnelheden optreden tot zelfs $1,5 \text{ m/s}$, waarbij dan wel de meestal geringe scheepvaart geheel gestremd wordt (bijvoorbeeld het gekanaliseerde riviertje de Tjonger). Als vuistregel voor de grotere, veelal drukke vaarwegen die tevens een afstromingsfunctie hebben, wordt aanbevolen dat de gemiddelde stroomsnelheid U_0 niet groter mag zijn dan $0,5 \text{ m/s}$.

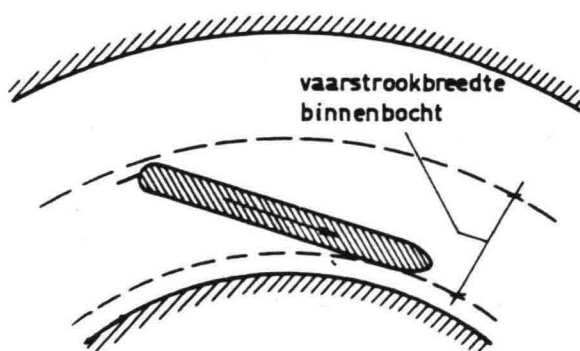
4.3. Dwarsprofiel in bochten

De benodigde vaarstrookbreedte voor een schip wordt bij het doorlopen van een bocht veel groter dan bij een recht gedeelte. Dit wordt veroorzaakt door de schuine ligging van het schip ten opzichte van de kanaalas (extra drifthoek in verband met het opheffen van de middelpuntvliedende kracht) bij het varen in bochten. Verder wordt dit nog versterkt door de slechte koersbepaling van het schip bij het doorlopen van bochten. De positie van een schip moet namelijk door de roerganger ten opzichte van de kanaaloevers worden bepaald, hetgeen vooral bij het ingaan van de bocht problemen oplevert.

Bij het varen door de buitenbocht zal zo dicht mogelijk de buitenoever worden aangehouden. Tijdens deze manoeuvre mag niet op de reacties van het schip worden afgegaan, omdat dan het gevaar bestaat dat het schip in de buitenbocht de oever inloopt. Men zal dan ook meestal geneigd zijn enigszins op de binnenbocht af te koersen en daarbij de snelheid iets op te voeren. Hierdoor kan het voorkomen dat men een buitenbocht met grotere snelheid doorloopt dan in de meeste gevallen wenselijk is.

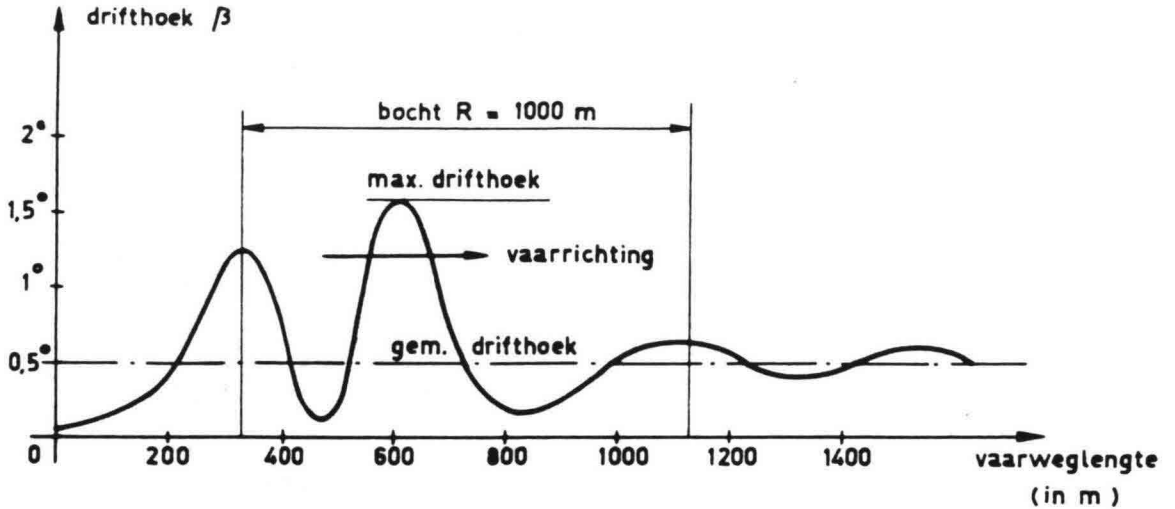
Bij het volgen van de binnenbocht wordt roer gegeven in de richting van de binnenbocht om het schip behoorlijk onder controle te houden. Het voordeel bij deze manoeuvre is, dat het schip de stuurman als het ware steeds inlicht omtrent de situatie waarin het verkeert (zie figuur 4.34). Nadelig is hierbij de grote roerhoek die nodig is voor de koerswijziging en om de oeverzuiging te weerstaan. De vaarsnelheid is hierbij meestal beperkt, waarbij de mogelijke ondiepere bodemligging uiteraard zijn beperkingen stelt. Dit geldt zeker voor geladen schepen, indien het gaat om gekanaliseerde rivieren.

Bij het varen door bochten kan optische geleiding (windscherm of bomen) het koershouden veelal vergemakkelijken.



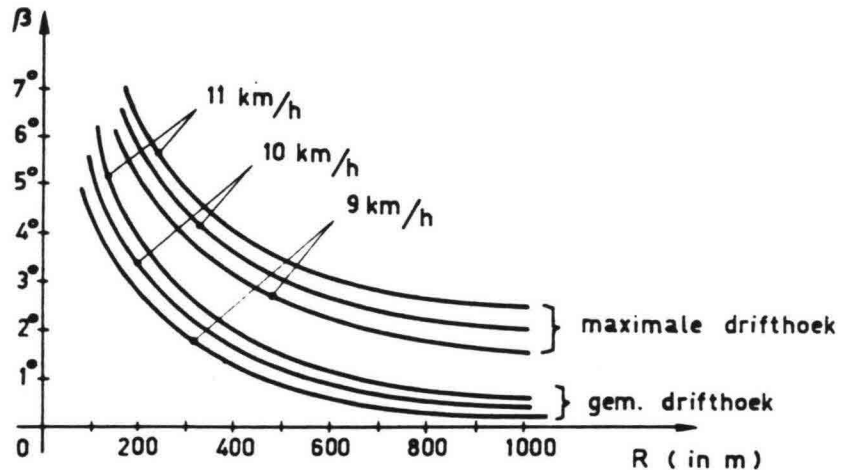
Figuur 4.34. Binnenbocht varen

De grootste moeilijkheid voor een schip vormt wel de overgang van een recht kanaalgedeelte naar de bocht zelf, omdat de roerganger hier de positie van zijn schip drastisch moet veranderen. Hij kan zijn koers moeilijk meer bepalen ten opzichte van de kanaaloevers. Het schip zal dan ook in het begin gaan slingeren om een bepaalde drifthoek. Bevindt het schip zich eenmaal in de bocht, dan zal dit slingeren snel gaan afnemen. De stuurman kan zich nu weer enigszins ten opzichte van de oevers oriënteren. Bij het uitgaan van de bocht ondervindt het schip een enkele maal nog een kleine schommeling om de gemiddelde drifthoek, maar meestal geeft dit echter geen problemen (zie figuur 4.35).



Figuur 4.35. Verloop drifthoek bij het doorlopen van een bocht door een schip

De drifthoek wordt in verband met de optredende middelpuntvliedende versnelling (V^2/R) groter naarmate de snelheid van het schip groter wordt en/of de straal van de bocht kleiner wordt. In figuur 4.36 is het verloop van de gemiddelde en de maximale drifthoek uitgezet als functie van de snelheid en de straal van de bocht, zoals deze door Schäle [66 en 67] bij proeven voor het Main-Donau-kanaal voor duwkonvoeien van 160 m lengte en 9,5 m breedte zijn gevonden.

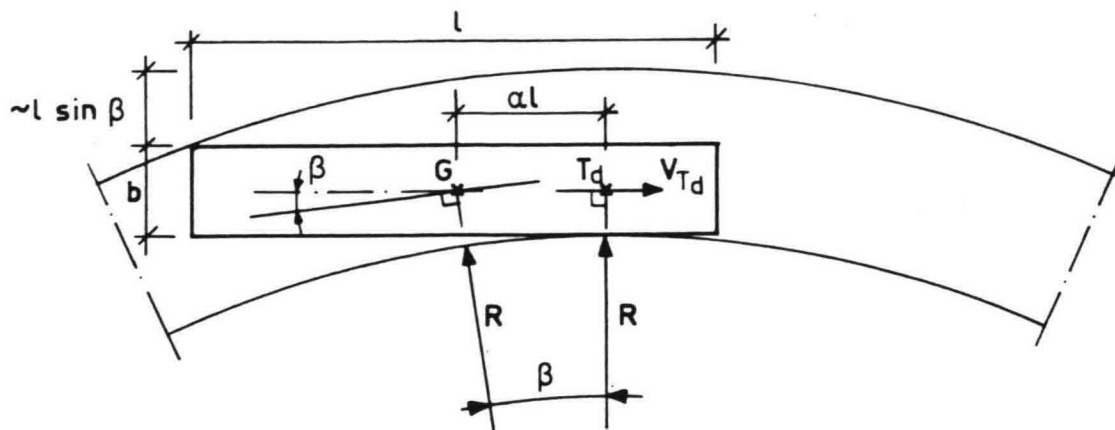


Figuur 4.36. Verband tussen drifthoek, vaarsnelheid en boogstraal

Uit figuur 4.36 volgt dat bij boogstralen $R > 1000$ m praktisch geen drifthoeken β optreden, zodat de benodigde vaarstrookbreedte B beperkt blijft. De benodigde **extra vaarstrookbreedte** ΔB kan, voor dergelijke boogstralen, waarbij de verhouding R/l voldoende groot is, volgens Kuhn [68] globaal worden afgeleid uit de grootte van de drifthoek β .

Uit figuur 4.37 blijkt de benodigde padbreedte bij benadering (voor een kleine hoek β geldt: $\tan \beta \approx \sin \beta \approx \alpha \cdot l/R$) uit:

$$B = b + \Delta B = b + l \cdot \sin \beta = b + \alpha \cdot l^2/R \quad (105)$$



Figuur 4.37. Benodigde padbreedte bij het doorlopen van een bocht

De afstand $\alpha \cdot l$ is afhankelijk van de ligging van het taktisch draaipunt (T_d) ten opzichte van het gewichtszwaartepunt (G). Het taktisch draaipunt is gedefinieerd als het punt, gelegen op de lengteas van het schip, waarvan de snelheidsvektor samenvalt met de lengteas van het schip. Voor iemand die zich aan boord van het schip bevindt, draait het schip dus schijnbaar om T_d . Bij kleine snelheid ligt het taktisch draaipunt dicht bij het gewichtszwaartepunt. Bij toename van de snelheid, dus bij toename van de drifthoek β , ligt het taktisch draaipunt veelal op $1/6$ à $1/3 \cdot l$ achter de voorstevan van het schip (vuistregel).

De ligging van het taktisch draaipunt is niet éénduidig, maar wordt onder andere bepaald door de beladingsgraad (λ), de eigenschappen van de duweboot, aanwezigheid van koproeren enz.. Voor lege duweenheden die met zeer grote snelheid stroomafwaarts varen, waarbij dus zeer snelle koersveranderingen zullen optreden, kan het taktisch draaipunt zelfs voor de boeg komen te liggen.

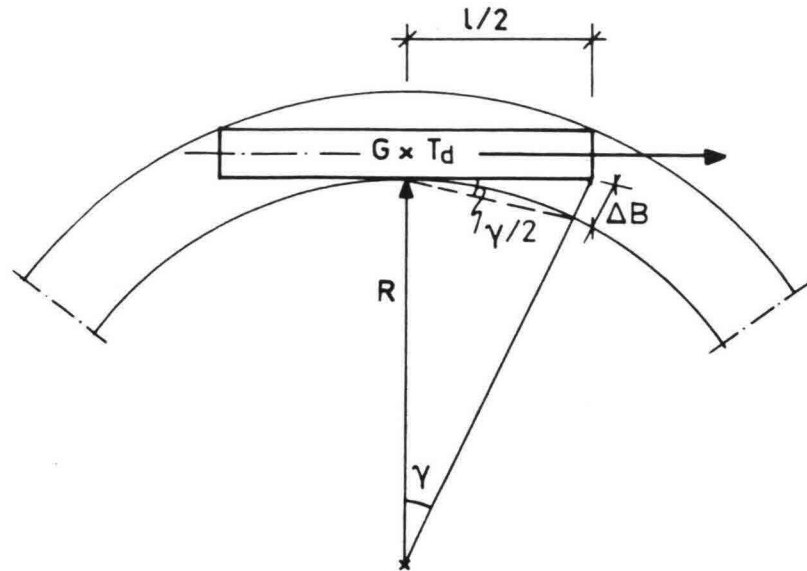
Bij dergelijke manoeuvres kan zelfs z.g. "uitglijden" van de formatie optreden, waarbij alle punten op de lengteas van de duweenheid een dwars-scheepse verplaatsing in dezelfde richting ondergaan.

Indien de boogstraal (dus ook de vaarsnelheid) erg klein wordt ten opzichte van de scheepslengte, dan gaat vergelijking (105) niet meer op. Ook al is de extra drifthoek β gelijk aan nul (taktisch draaipunt en gewichtszwaartepunt vallen samen), dan is er toch een minimum extra padbreedte ΔB noodzakelijk (zoals uit figuur 4.38 blijkt).

$$\begin{aligned} \text{Nu geldt: } \tan \gamma &= 0,5 \cdot l/R \\ \text{en: } \tan \gamma/2 &= \cancel{0,5} \cdot \Delta B / (l \times \frac{1}{2}) \end{aligned}$$

Voor kleine hoek γ geldt verder: $\tan \gamma = 2 \cdot \tan \gamma/2$
waaruit volgt:

$$\Delta B = \frac{1}{8} \cdot \frac{l^2}{R} \tag{106}$$



Figuur 4.38. Extra padbreedte indien géén drifthoek aanwezig is in verband met de geringe vaarsnelheid

Door Schäle [69] zijn een aantal grafieken samengesteld, gebaseerd op prototypemetingen in o.a. gekanaliseerde rivieren van duweenheden in diverse formaties, varende met een snelheid ten opzichte van het water van $V'_S = 14$ km/h. Voor de stroomsnelheid van het water ten opzichte van de oever is uitgegaan van een situatie met $U_0 = 0,83$ m/s (3 km/h) en van een situatie met $U_0 = 1,66$ m/s (6 km/h). Uit deze grafieken kan nu direct de benodigde padbreedte worden afgelezen als functie van de boogstraal, de formatie van de duweenheid en de vaarsnelheid ten opzichte van de oever (opvaart $V_S = 8$ of 11 km/h en afvaart $V_S = 17$ of 20 km/h).

Uit vergelijking (105) en (106) werd reeds gevonden dat de extra padbreedte in bochten geschreven kan worden als een gedeelte dat onafhankelijk is van de drifthoek β , namelijk:

$$\Delta B = 0,125 \cdot l^2 / R$$

en een gedeelte dat direct afhankelijk is van de drifthoek β , namelijk:

$$\Delta B = \alpha \cdot l^2 / R$$

waarin α afhangt van de afstand tussen het gewichtszwaartepunt (G) en het taktisch draaipunt (T_d), hetgeen weer samenhangt met de vaarsnelheden.

Uit een analyse van de door Schäle opgestelde grafieken blijkt dat de resultaten "gevangen" kunnen worden met de volgende formule:

$$\Delta B = [0,035 \cdot V_S + 0,125 \cdot (1 - R/1000)] \cdot l^2 / R \quad (107)$$

waarin de vaarsnelheid van het schip ten opzichte van de oever V_S wordt uitgedrukt in km/h.

Door de Werkgroep Vaarwegvakken [65] is uit een beperkt literatuuronderzoek naar bochten eveneens gebleken dat alle toegepaste formules voor zowel zee- als binnenvaart zijn terug te voeren tot:

$$\Delta B = \alpha' \cdot l^2 / R$$

Opvallend daarbij was echter dat de aanbevelingen voor de coëfficiënt α' zeer sterk uiteenliepen. Voor het kanaal Gent-Terneuzen (zeevaart) werd bij het ontwerp uitgegaan van $\alpha' = 2$ voor bochten in een tweestrooks vaarweg. Voor het Noordzeekanaal (zeevaart) daarentegen beveelt van de

Made [70] een waarde $\alpha' = 1$ aan. Ditzelfde geldt voor de Franse normen ten aanzien van de binnenvaart [71], waar eveneens een waarde van $\alpha' = 1$ wordt aangehouden. Ismail [72] zowel als Press [73] bevelen voor de binnenvaart weer $\alpha' = 0,5$ aan. Geen van de aanbevelingen wordt echter theoretisch onderbouwd en zijn allen onafhankelijk van de vaarsnelheid gekozen, waarbij vermoedelijk onbewust is uitgegaan van een min of meer konstante ontwerpvaarsnelheid voor de toegepaste bochten.

Uit modelonderzoek van het Waterloopkundig Laboratorium [74] op stil water bij $R/l \geq 10$ is gebleken dat er nauwelijks extra padbreedte nodig is, hetgeen aansluit op de CEMT-regel. Verder bleek uit het onderzoek voor waarden $R/l \leq 10$ dat voor vierbaksduwstellen op niet stromend water de gemiddelde extra padbreedte bij ongeladen duweenheden redelijk te benaderen viel met $\alpha' = 0,5$, terwijl voor geladen duweenheden met $h_o/d_m \geq 1,4$ de extra padbreedte ruwweg de helft hiervan bedroeg, namelijk $\alpha' = 0,25$. Dit modelonderzoek is getoetst aan praktijkonderzoek met vierbaksduwstellen door de dienst Verkeerskunde van Rijkswaterstaat [75] (zie ook de Ruiters [76]) en daarnaast vergeleken met het reeds eerder vermelde uitgebreide prototype onderzoek van Schüle [67]. In beide gevallen werd een redelijke overeenkomst gevonden.

Bij al dit onderzoek werd de bocht met een praktisch konstante vaarsnelheid doorlopen. Van z.g. "aangepast" bochtvaren, wat bij onoverzichtelijk en moeilijk bevaarbare bochten een voorwaarde is om de bocht goed door te komen, was hierbij geen sprake.

De Werkgroep Vaarwegvakken, van de Commissie Vaarwegbeheerders, kwam op grond van het bovenstaande tot de volgende aanbevelingen:

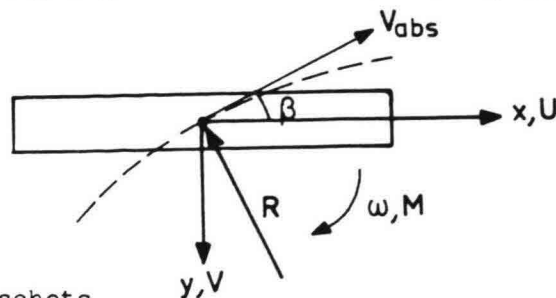
Op grond van de resultaten van het duwvaartonderzoek en de literatuurstudie wordt voor de gemiddelde extra padbreedte in een bocht aanbevolen:

- voor een leeg schip : $0,50 \cdot l^2/R$
- voor een geladen schip: $0,25 \cdot l^2/R$

Dit betekent dat voor de ontmoeting van twee maatgevende lege schepen een bochtverbreding moet worden toegepast gelijk aan l^2/R , gerekend in het kielvlak van het ongeladen schip. Voor de ontmoeting van twee maatgevende geladen schepen is een bochtverbreding nodig gelijk aan $0,50 \cdot l^2/R$, gerekend in het geladen kielvlak.

Opm.: Uit proeven is gebleken dat het diepste gedeelte van het ongeladen schip bij de klassen I t/m IV, namelijk het achterschip, circa 1 m ondieper ligt dan het kielvlak van het schip in geladen toestand.

In de studies [74] en [75] is een theoretische afleiding gegeven voor de evenwichtshoek met behulp van de zogenaamde "zero-aspect-ratio wing theorie". Voor een met het schip meebewegend assenkruis (x, y, z) gelden de volgende bewegingsvergelijkingen voor een varend schip (zie figuur 4.39).



Figuur 4.39. Definitieschets

$$\Sigma F_x = m \cdot (\dot{U} - V \cdot \omega) \quad (108)$$

$$\Sigma F_y = m \cdot (\dot{V} + U \cdot \omega) \quad (109)$$

$$\Sigma M_z = I \cdot \dot{\omega} \quad (110)$$

Hierin stellen F_x en F_y de krachten, U en V de snelheden en \dot{U} en \dot{V} de versnellingen voor in x - respektievelijk y -richting. M_z is het moment om de z -as (loodrecht op het vlak van tekening), ω de koershoeknelheid en $\dot{\omega}$ de hoekversnelling.

Voor een stationaire toestand van een schip op een draaicirkel ($\dot{U} = \dot{V} = \dot{\omega} = 0$) wordt verder gesteld dat de bewegingsvergelijking in x -richting niet van invloed is op de bepaling van de evenwichtsdrifthoek. Wanneer de invloed van de wind ook nog buiten beschouwing wordt gelaten ($Y_w = M_w = 0$) dan volgt daaruit, bij verdere verwaarlozing van hogere orde termen:

$$\begin{aligned} \Sigma F_y = Y_\beta + Y_R + Y_S + Y_D = \\ = m \cdot U \cdot \omega = Y_C = m \cdot \frac{V_{abs}^2}{R} \cdot \cos \beta \end{aligned} \quad (111)$$

en

$$\Sigma M_z = M_\beta + M_R + M_S = 0 \quad (112)$$

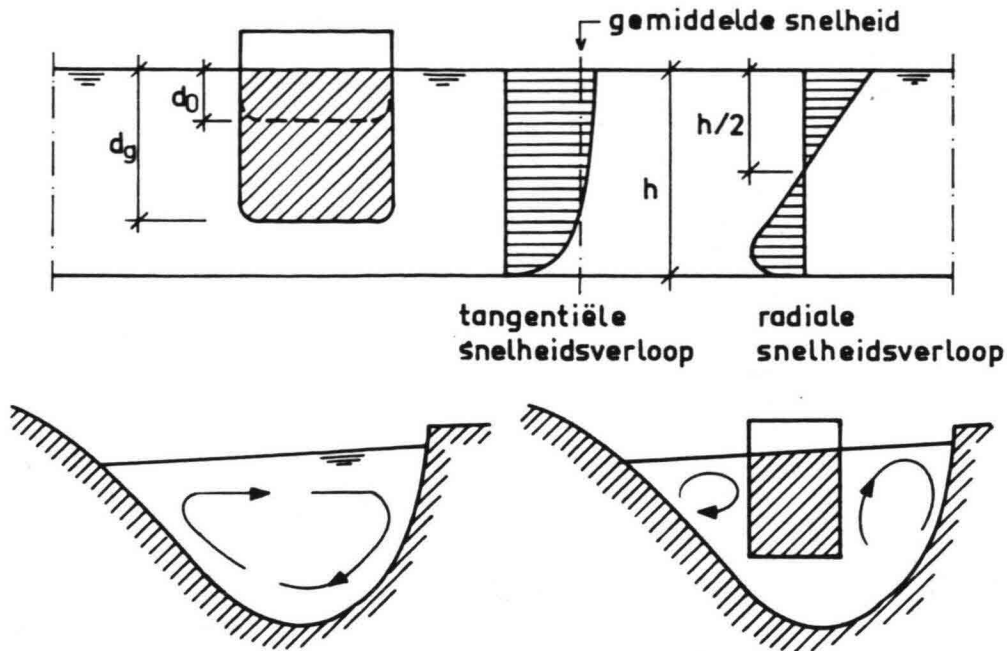
- Hierin stelt Y_C de centrifugaalkracht voor in y -richting.
- De driftkracht Y_β wordt geïntroduceerd als de ontbondene van de stromingsdruk ten gevolge van de drifthoek β . Aangezien deze driftkracht in het algemeen niet in het zwaartepunt zal aangrijpen wordt daarmee het driftmoment $M_\beta = a \cdot Y_\beta$ geïntroduceerd. Beide worden sterk beïnvloed door de zogenaamde kielspelingsfactor $h_o/(h_o - d)$.
- De dempingskracht Y_w wordt veroorzaakt door de druk- en zogkrachten ten gevolge van de draaiing van het schip en het dempend moment M_w door de koershoeknelheid ω van het schip die ten opzichte van het water ontstaat.
De maximale koershoeknelheid is $\omega_{max} = 57 \cdot V_{abs}/R_{cr}$ (hierin is R_{cr} de kritische boogstraal) en ligt in het gebied $0,3 \text{ }^\circ/\text{s} < \omega_{max} < 0,6 \text{ }^\circ/\text{s}$. Ook deze blijkt sterk afhankelijk van de kielspelingsfactor.
- De roerkracht Y_R en vooral het roermoment M_R moeten uiteindelijk zorgen voor het evenwicht. De roerkracht in een bocht blijkt onder andere evenredig met V_{rel}^2/R te zijn.
- De dwarskracht Y_S en het daardoor ontstane giermoment M_S worden veroorzaakt door het schuin op het schip toestromende water.
- Tenslotte is Y_D de dwarsverhangkracht, welke ongeveer gelijk is aan $Y_D = m \cdot V_S^2/R \cdot \cos \beta$.

Uit de vergelijkingen (111) en (112) volgt na enige bewerking tenslotte een betrekking voor de drifthoek β **in het gewichtszwaartepunt** van het schip (G), namelijk:

$$\beta = \frac{1 \cdot b}{\pi \cdot d \cdot R} \cdot \left\{ 2 \cdot \frac{V_{abs}}{V_{rel}} - 1 \right\} \cdot \{ 1 - d/h_o \} \quad (113)$$

De relatieve snelheid (V_{rel}) is het verschil tussen de absolute snelheid (V_{abs}) en de gemiddelde stroomsnelheid. Dat verder de verhouding d/h_o een belangrijke rol speelt hangt sterk samen met de stromingsdruk en dus met het optredende snelheidsverloop over de vertikaal in de bocht ten gevolge

van de door het schip al of niet sterk verstoorde spiraalstroming tijdens de passage (zie figuur 4.40).



Figuur 4.40. Stroomsnelheidsverloop in een bocht

Bij diepgeladen schepen (d_g) kan de spiraalstroming door het schip zelfs in twee spiraalstromen uiteenvallen. Verder zal bij ongeladen schepen (kleine d_0 , dus een grote h_0/d -verhouding) alleen de naar de buitenbocht gerichte oppervlaktestroom in dwarsrichting op het schip werken. In bedoelde studies wordt ook nog een ingewikkelde afleiding gegeven, waar bij de invloeden van de spiraalstroom als correctie op de uiteindelijke drifthoek wordt meegenomen. Daaruit blijkt heel duidelijk de invloed hiervan op de afvaart van ongeladen duwstelen. Aangezien echter de meetresultaten van ongeladen duwstelen toch nog sterk afwijken van de gecorrigeerde drifthoek, wordt hierop verder niet ingegaan.

Voor vergelijking (113) geldt trouwens ook een niet al te grote nauwkeurigheid. Voor de afvaart worden te kleine drifthoeken β gevonden, waarbij opvalt dat de vergelijking beter wordt naarmate de h_0/d -verhouding kleiner wordt, dus de schepen meer beladen zijn. Voor de opvaart worden altijd te kleine waarden voor de drifthoek β gevonden. Een verklaring voor de vrij aanzienlijke afwijkingen heeft onder andere te maken met de niet juiste aanname van de stationaire toestand ($\dot{U} = \dot{V} = \dot{\omega} = 0$) tijdens het doorlopen van de bocht. Zowel de snelheid van het water als van het schip zullen in de tijd vrij sterk variëren. Het schip zal in het algemeen vóór het ingaan van de bocht snelheid minderen om bij het doorlopen van de bocht zelf te kunnen versnellen. Voor uitgebreidere informatie wordt verwezen naar het afstudeerverslag van Van der Linde [77].

Resumerend kan gesteld worden dat de benodigde extra vaarstrookbreedte in (rivier-) bochten berekend met vergelijking (107) goed blijkt te voldoen, uitgezonderd voor de ongeladen afvaart. Hiervoor moet circa 15% extra worden genomen. Voor de aanleg van nieuwe scheepvaartkanalen kunnen de aanbevelingen van de Werkgroep Vaarwegvakken worden aangenomen. Voor lege schepen wordt dit $0,5 l^2/R$ en voor geladen schepen $0,25 l^2/R$ per vaarstrook.

In de praktijk kan dit neerkomen op een noodzakelijke bochtverbreding, zeker voor kleine R/l-verhoudingen.

In het algemeen wordt wel gesteld dat voor $R/l \geq 10$ en/of voor $R > 1000$ m geen bochtverbreding voor de kleinere vaarwegen t/m IV toegepast behoeft te worden. Voor bochten met $R/l < 10$ moet wel met extra breedtetoeslag worden gerekend. Bochten met $R/l < 4$ zijn in principe niet acceptabel, tenzij voldoende bochtverbreding wordt toegepast om het gemiddelde breedte beslag van de schepen te compenseren.

Volgens vergelijking (107) kan hiervoor ook een oplossing worden gevonden door de vaarsnelheid in de bocht te beperken. Bij deze waarden gaan de benodigde roerhoeken relatief sterk oplopen, terwijl er verder sprake is van zogenaamde vaartafval (verlies aan vaarsnelheid) bij het doorlopen van de bocht. Voor $R/l = 3 \text{ à } 4$ is de vaartafval circa 10 à 20%, voor nog kleinere waarden neemt deze sterk toe. Voor kanalen die ontworpen zijn voor grote verkeersintensiteiten met hoge vaarsnelheden, wordt als ondergrens $R/l \leq 6$ genomen.

Uit metingen is verder vast komen te staan dat bij het varen in een bocht tussen de waarden $3 < R/l < 8$ de slingering rondom de evenwichtsstand van vergelijkbare grootte is als bij het varen in de rechtstand (evenwichtsdrifthoek is 0°).

De werkgroep Vaarwegvakken [65] heeft voor bochten in scheepvaartkanalen klasse I t/m IV de volgende vuistregel opgesteld:

- normaal profiel : $R/l \geq 6$
- krap profiel en éénrichtingsprofiel: $R/l \geq 4$

Voor een kanaal met bakvormig profiel voor tweerichtingsverkeer is de benodigde extra ruimte voor lege schepen maatgevend, en wordt volgens eerdere aanbeveling $\Delta B = l^2/R$. Voor $R/l = 4$ respectievelijk $R/l = 6$ komt dit, voor schepen met $l/b = 8$, dan neer op $\Delta B = 0,25 l = 2 b$ respectievelijk $\Delta B = 0,16 l = 1,33 b$.

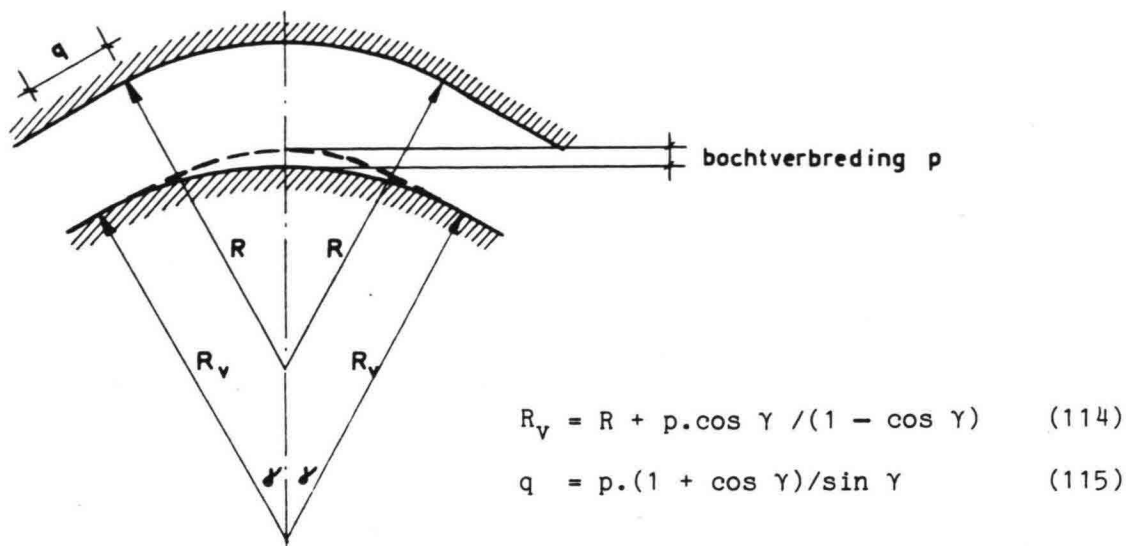
Voor de klasse IV vaarwegen wordt in Duitsland bij de aanleg van het Rijn-Main-Donaukanaal en de rekonstruktie van het Mittellandkanaal een boogstraal van $R = 900$ m gehanteerd. Voor incidentele tweebaksduwvaart ($l = 180$ m) komt dat neer op $R/l = 5$, en voor de echte klasse IV vaartuigen op $R/l = 11$.

Zoals reeds eerder vermeld zou het niet nodig zijn om voor bochten met $R/l > 10$ een bochtverbreding voor de klassen I t/m IV toe te passen. Voor kanalen bestaande uit een bakprofiel wordt echter aangeraden wel een bochtverbreding toe te passen met het oog op het ruimtebeslag van de lege schepen. In het overgangsgebied $10 < R/l < 20$ wordt deze bochtverbreding dan gesteld op $0,5 l^2/R$, hetgeen neerkomt op $0,2 \text{ à } 0,4 b$ voor schepen met een $l/b = 8$ verhouding.

Door Schäle [69] wordt in een bocht voor een tweestrooksvaarweg voor 4-baks duwstellen, in analogie met een recht kanaal, veiligheidsstroken toegepast. In het kielvlak beveelt hij hiervoor de volgende maten aan:

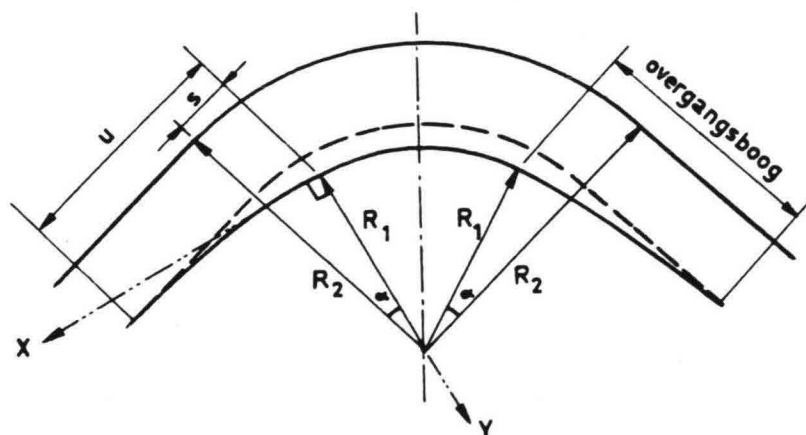
1) Tussen vaarbaan en oever binnenbocht	+ 10 m (ca. 0,45 b)
2) Tussen beide vaarbanen	+ 20 m (ca. 0,9 b)
3) Tussen vaarbaan en oever buitenbocht	+ 20 m (ca. 0,9 b)
Totaal	+ 50 m

De overgang van het dwarsprofiel in de rechtstand naar het verbrede profiel in de bocht moet geleidelijk verlopen. Indien deze overgang bij het ingaan van de bocht te plotseling gebeurt, dan veranderen de krachten op een schip ten gevolge van hydraulische verschijnselen eveneens vrij plotseling. Men moet de positie van het schip hierop aanpassen door roerkorrektes. Om een regelmatig verloop te verkrijgen worden volgens Kuhn [68] wel verspringende bogen toegepast (zie figuur 4.41).



Figuur 4.41. Bochtverbreiding met verspringende bogen

Bij groter wordende tangenhoek ($\gamma > 20^\circ$) zal in het algemeen worden overgegaan op het toepassen van overgangsbogen (zie figuur 4.42).



Figuur 4.42. Bochtverbreiding met overgangsbogen

Hiervoor wordt dan b.v. een kwadratische parabool

$$y = x^2 / (2R_1) \quad (116)$$

toegepast, waarbij wordt gevonden dat:

$$s = R_1 \cdot \sin \alpha \quad (117)$$

$$u = R_1 / 2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot (\cos \alpha + 1 / \cos \alpha) \quad (118)$$

Bij deze oplossing is een veilige afwikkeling van het verkeer in bochten mogelijk geworden.

Door de Werkgroep Vaarwegvakken is als algemene regel voor de kleinere klasse IV vaarwegen aanbevolen om de overgang van het profiel in de rechtstand naar het verbrede bochtprofiel onder een helling van 1 : 20 te laten verlopen. Dit komt voor $R/l = 4$ en $R/l = 6$ neer op een overgangslengte van 3 l, respectievelijk 2 l. De verbreding vindt plaats in de binnenbocht, aangezien daarbij de bocht kan worden "afgesneden" indien het overige verkeer dat toelaat, waardoor de straal van de gevaren baan groter wordt dan de bochtstraal zelf.

4.4. Lengteprofiel en tracé

Het zal in de praktijk vrijwel nooit voorkomen dat begin- en eindpunt van het kanaal zijn gegeven, en dat daartussen de kortste verbinding wordt gekozen. Bij een onderzoek naar het horizontale alignement, het tracé (situatie) zal vrijwel altijd blijken dat dit niet tot een optimale oplossing leidt.

Zelfs als het eindpunt een haven, industrie of te ontwikkelen industrie is, laat de situatie van dit eindpunt meestal nog wel enige keuzevrijheid toe. Het beginpunt bij een dergelijk kanaal, en het eindpunt van een kanaal dat twee vaarwegen moet verbinden, laat nog veel meer vrijheid.

Indien het tracé van een aan te leggen scheepvaartkanaal gegeven is - bijvoorbeeld in de meest simpele vorm: beginpunt, eindpunt, en kortste verbinding daartussen - dan moet het lengteprofiel van het kanaal worden opgezet.

De belangrijkste beslissing welke dan moet worden genomen is: kiezen we een kanaal dat een open verbinding geeft tussen begin- en eindpunt, of een kanaal waarin één of meer waterkeringen (meestal schutsluizen) voorkomen en waarbij het kanaal dus verdeeld is in kanaalpanden met ongelijke waterspiegel.

In feite zal bij de tracébevestiging al rekening moeten worden gehouden met de gevolgen voor het lengteprofiel. Hierbij spelen verschillende factoren een rol. Hier wordt volstaan met een opsomming van factoren voor de bepaling van zowel het tracé als het lengteprofiel van een scheepvaartkanaal, waarna apart enkele belangrijke kenmerken van het tracé en het lengteprofiel worden behandeld. Deze opsomming is niet volledig.

Enkele belangrijke factoren zijn:

Topografische en hydrografische factoren

gebaseerd op **technische eisen** voor de gebruiker/bouwer/beheerder:

- a. Waterstanden en waterstandsvariëaties aan het beginpunt (bv. kanaal aftakkend van een rivier) of aan het begin- en eindpunt (verbinding tussen twee zeeën of rivieren).
- b. Waterbalans, grondwaterstanden en grondwaterstroming.
- c. Grondbalans, hoogteligging maaiveld.
- d. Te verwachten beweging in de bodem (gaswinning, kolenmijnen).
- e. Samenstelling en gelaagdheid van de bodem.
- f. Met begreking tot het lengteprofiel het al dan niet toepassen van schutsluizen, o.a. rekening houdend met het grondwaterpeil.
- g. Met betrekking tot de scheepvaart de mogelijke bochtstraal, de kanaallengte.

Planologische en andere omgevingsfactoren

gebaseerd op **planologische eisen** voor de omgeving (aantrekkelijk versus afstotend, d.w.z. voordelen versus schaden):

- h. Kruisingen met andere infrastructuurwerken, zoals andere vaarwegen, stroomgeulen, wegen, spoorlijnen, kabels en leidingen.
- i. Schadesnijdingen (doorsnijdingen van landerijen e.d.), afbraak van woningen etc.
- j. Drainage, bevoeling, uitdroging, verdrassing (hydrologische gevolgen).
- k. Esthetische factoren, natuur- en landschapswaarden.
- l. Militaire factoren (wel of geen kwetsbare sluizen).

Economische factoren

gebaseerd op **kosten** voor gebruiker/bouwer/beheerder/omgeving:

- 1. Direkte kosten: aanleg (sluizen, grondverzet e.d.) en onteigening.
- 2. Indirekte kosten: wachttijden, bediening/onderhoud.

4.4.1. Het tracé

De tracékeuze-problematiek is voor een vaarweg vergelijkbaar met die van een weg, zij het aangevuld met het element water in samenhang met de omgeving. Om tot een goede tracékeuze te komen staan de ontwerper in principe dezelfde technieken terzijde, zoals de multi-kriteria-analyse. De criteria kunnen worden afgeleid uit de hiervoor genoemde topografische, hydrografische, planologische en economische factoren.

Voor het traceren zijn duidelijke landkaarten met hoogtelijnen onvermijdelijk. Op kaarten met schaal 1 : 50.000 of 1 : 25.000 wordt de hoofdrichting globaal vastgesteld, waarna een terreinverkenning te voet volgt. In ontwikkelingslanden maakt men, veelal bij gebrek aan goede kaarten, gebruik van luchtopnamen.

De kortste verbinding lijkt op het eerste gezicht de goedkoopste wat betreft de bouwkosten. Voor de scheepvaart is echter de totale vaarlengthe van belang, dus inclusief de bestaande vaarwegen en de te bouwen schutsluizen. Vooral het oponthoud bij sluizen en de reistijd zijn hierbij belangrijk.

Evenals bij de stroomkanalen zal zo lang mogelijk een hoogtelijn worden gevolgd, waarmee ingravingen en ophogingen worden beperkt en zoveel mogelijk de grondwaterspiegel wordt gevolgd. Aan de andere kant, als in het tracé van hoogtelijn veranderd wordt, dan liefst zo snel mogelijk, zodat aldaar een sluis kan worden geprojecteerd; sterke hellingen zijn dan aantrekkelijk. Verder zal steeds getracht worden zoveel mogelijk rechte kanaalgedeelten, verbonden door bogen met zo groot mogelijke straal, aangepast aan de afmetingen van de te verwachten schepen, toe te passen. Bij de situering van een schutsluis dient verder rekening te worden gehouden met een voldoende remzicht voor de schepen. Dit vraagt om rechte kanaalaansluitingen op het kunstwerk.

Bij de keuze van het tracé kan soms met voordeel gebruik gemaakt worden van reeds bestaande natuurlijke of aangelegde waterwegen, door deze hierin op te nemen. Ter stimulering van industrievestigingen in of nabij bevolkingscentra kan het tracé plaatselijk worden aangetrokken of kan gebruik worden gemaakt van een aan te leggen zijkanaal, welke de toekomstige haven met het kanaal verbindt.

Kruisingen met bestaande wegen, spoorwegen en waterkeringen worden zoveel mogelijk haaks uitgevoerd, of indien mogelijk vermeden. Hierbij zal getracht worden deze zoveel mogelijk te combineren (verkeers- en spoorbrug).

Nagegaan dient te worden of het debiet van kruisende stroomgeulen in het kanaal kan worden afgelaten of dat er een duiker onder het kanaal moet worden doorgevoerd. In het laatste geval zal onderzocht moeten worden of door het maken van parallelsloten langs het kanaal een aantal afvoerende geulen of beken gebundeld kunnen worden tot één duiker of syphon.

Voor het kruisende wegverkeer geldt uiteraard hetzelfde. Hiertoe dient de verkeersintensiteit van nu en in de toekomst van de gekruiste wegen in beschouwing genomen te worden, en zal men met behulp van parallelwegen langs het kanaal tot bundeling van het aantal verkeersbruggen trachten te komen op centraal gelegen punten.

Voor het spoorwegverkeer geldt als regel dat omlegging hiervan zeer kostbaar is en zo mogelijk vermeden dient te worden.

Bij kruisingen en aansluitingen op rivieren zal men moeten letten op de overzichtelijkheid voor de scheepvaart, waarbij bij liefst een aansluiting op de buitenbocht wordt gekozen in verband met de daar aanwezige vaardiepte en de geringe kans op aanzanding ten gevolge van de spiraalstroom.

In kleigrond bijvoorbeeld kunnen steilere taluds worden toegepast dan in zandgrond, waardoor het grondverzet kleiner zal zijn. Positieve en negatieve kwel spelen bij grind en zandgrond een belangrijke rol, in tegenstelling tot de veelal verwaarloosbare kwel bij kleigrond.

In de waterbalans spelen verdamping, kwel, schutverliezen, lekverliezen, regenval enz. een belangrijke rol. Deze waterbalans moet uitwijzen of ergens een "te veel" moet worden geloosd of een "te weinig" kan worden ingelaten langs natuurlijke of kunstmatige weg (pompen). De kwelverliezen kunnen ook door een toe te passen bodemafluiting worden tegengegaan, zoals bij het Julianakanaal).

De wens om het kanaalpeil zo mogelijk op gelijke hoogte te houden met het aanwezige grondwaterpeil kan bijvoorbeeld ingraving van het kanaal noodzakelijk maken. De te ontgraven grond kan dan veelal weer gebruikt worden als ophogingsspecie voor kanaaltrajekten in ophoging met dijken, opritten van verkeers- en spoorbruggen, verhoging van industrieterreinen langs het kanaal enz.

Een kostenberekening moet uitwijzen in hoeverre ontgraving en transport van specie in de natte of in de droge kan geschieden, waarbij het economischer kan zijn om de uitgegraven grond zijdelings te deponeren in plaats van het te transporteren naar veraf gelegen kanaalgedeelten. Bij praktisch loodrechte snijding van het tracé met hoogtelijnen in het terrein moet overwogen worden of toepassing van sluisbouw niet economischer is dan doorgaan met een steeds duurder wordende ingraving. Een daarmee gepaard gaand hoger gelegen kanaalpand heeft tevens het voordeel dat het zich beter aanpasten bij het bestaande grondwaterpeil.

4.4.2. Het lengteprofiel

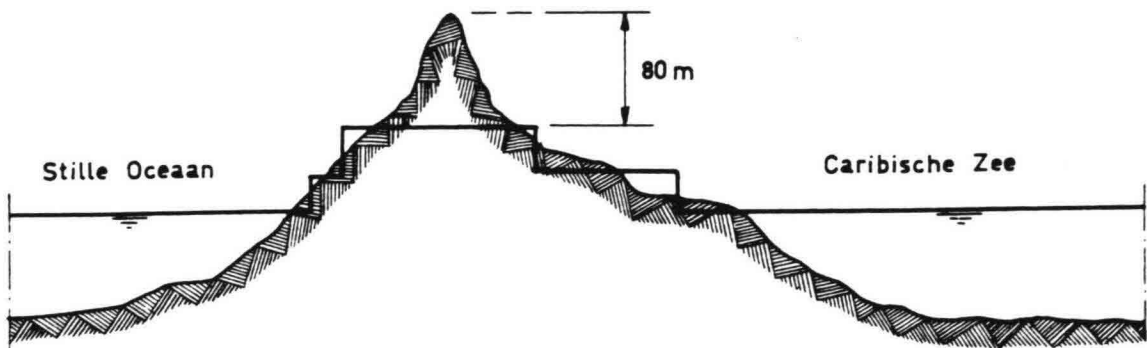
De belangrijkste beslissing die moet worden genomen bij de bepaling van het lengteprofiel is: kiezen we een kanaal dat een open verbinding geeft tussen begin- en eindpunt, of een kanaal waarin één of meer waterkeringen (meestal schutsluizen) voorkomen en waarbij het kanaal dus verdeeld is in kanaalpanden met ongelijke waterspiegel.

Ook hier spelen verschillende factoren een rol. Hier zullen voorbeelden van scheepvaartkanalen worden behandeld, waarbij op enkele van deze factoren wat nader zal worden ingegaan.

Als eerste voorbeeld beschouwen we een kanaal dat aan de ene zijde in verbinding staat met een zee, een meer, een kanaal, een rivier, maar aan de andere zijde doodloopt (bijvoorbeeld het Twentekanaal, of het toegangskanaal uit de Noordzee naar Europoort).

Is de waterstand in de zee, enz. onveranderlijk, dan is een open kanaal mogelijk. Indien de terreinhoogte langs het kanaal echter aanzienlijk afwijkt van de waterspiegel, kan een dergelijke oplossing grote moeilijkheden geven (diepe ingravingen, grondwaterverlaging) en zal men al gauw besluiten toch een andere waterstand in het kanaal te kiezen en dus een waterkering aan te brengen. Moelijker wordt het nog als de waterstand in de aansluitende zee, rivier enz. sterk variabel is (getij, stormvloed, variërende rivierstanden). In geval van een open kanaal kunnen velerlei bezwaren optreden: te grote stroomsnelheden in het kanaal door vulling en lediging (getij, stormvloed), aanslibbing door aangevoerde vaste stoffen, verzilting bij aansluiting naar zee. Verder zal de kanaalbodem zo diep moeten liggen, dat bevaarbaarheid mogelijk blijft bij zeer lage rivier- en zeestanden. Maar ook zal de waterkering met kaden en losplaatsen zo hoog moeten liggen, dat kering bij zeer hoge waterstanden mogelijk blijft (Europoorthaven). Daarom zal in deze omstandigheid vaak een waterkering aan het begin van een kanaal geplaatst worden (Noordzeekanaal - Zeesluis te IJmuiden). Een dergelijk type waterkering behoeft niet steeds water te keren; sommige staan een deel van het jaar, of een deel van het getij open. Zij keren dan allen de zeer hoge of zeer lage buitenwaterstanden (dokhavens aan zeeën met grote getijverschillen, zoals in Engeland en Frankrijk; ook de stormvloedkering in de Hollandse IJssel).

Veel vaker komt het voor, dat een kanaal aan beide uiteinden in verbinding staat met een ander vaarwater. Is het niveau van beide waterspiegels gelijk en onveranderlijk, dan is een open kanaal mogelijk. Een voorbeeld is het Suezkanaal. Een complicatie vormt wel het getij, dat aan beide zijden niet in fase is en bovendien sterk verschilt in amplitude (Middellandse zee klein, Rode zee groot). Een dergelijke open verbinding had men ook kunnen ontwerpen voor het Panamakanaal, de verbinding tussen de caraïbische Zee en stille Oceaan. Ook hier een onbetekenend verschil in gemiddelde waterstand, aan de ene zijde een klein, aan de andere zijde een groot getijverschil. Ondanks het strategisch belang van een open verbinding hebben de V.S. toch moeten beslissen tot een gesloten kanaal; dit in verband met de zeer diepe ingraving door de landengte. Aan elke zijde van de landengte is het kanaal met behulp van twee trappen (schutsluizen) op een hoger niveau gebracht, zodat de uitgraving in de waterscheiding is gereduceerd. Ook dan zijn er nog diepe ingravingen; maximaal zelfs 80 meter (figuur 4.43).

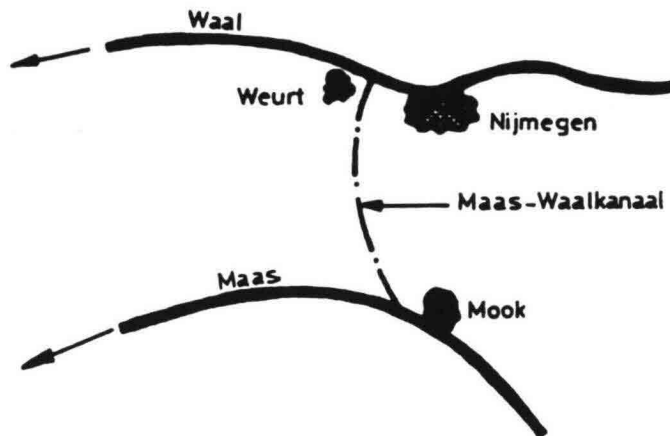


Figuur 4.43. Het Panamakanaal

Een open kanaal is in principe ook mogelijk indien het gaat om een kanaal dat twee vertakkingen van een zelfde rivier verbindt. Een voorbeeld is het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal, van de Waal bij Tiel naar de Nederrijn bij Wijk bij Duurstede. Beide takken hebben hetzelfde regime, zodat voor elk punt op de ene rivier wel een punt op de andere rivier is te vinden met een praktisch eenzelfde waterstandsverloop. Bij het Betuwepand is dit principe echter niet gevolgd. Een belangrijke faktor was, dat men toch sluizen wilde aan de uiteinden om de lengte aan bandijken in dit gebied (dijken aan weerszijden van het kanaal moeten eveneens tot bandijkhoogte worden aangelegd) niet te vergroten. De sluis in Tiel is nodig in verband met waterstandsverschillen tussen de beide riviertakken, terwijl de andere sluis bij Ravenswaay alleen gebruikt wordt bij hoog water op de rivier om overstroming van de laag gelegen kanaaldijken te voorkomen (keersluis).

Ook het Maas-Waalkanaal bij Nijmegen heeft hetzelfde principe als het Betuwepand; een gemaal zorgt ervoor dat, tijdens hoogwater op één of beide rivieren, het afgesloten kanaal op een laag peil wordt gehouden in verband met het toegevoegde schut- en kwelwater (zie figuur 4.44).

Bij het Maas-Waalkanaal gaat het om de verbinding van twee rivieren met een verschillend regime. Een open verbinding is in dat geval nooit mogelijk. Eén waterkering is dus altijd nodig.



Figuur 4.44. Het Maas-Waalkanaal

Dit is eveneens het geval indien het gaat om een kanaal dat twee punten van eenzelfde rivier verbindt. Een voorbeeld is het Julianakanaal, een zogenaamd lateraal kanaal van de Maas. Dit deel van de Maas (grensrivier tussen België en Nederland) was slechts tegen hoge kosten geschikt te maken voor de scheepvaart. Voor België was het in ieder geval zeker goedkoper om dit riviervak te vervangen door een kanaal op Nederlands grondgebied. Uiteraard dient hierin tenminste één waterkering te komen, omdat anders het kanaal te veel stroom zou trekken. In het geval van het Julianakanaal bleek met één sluis echter niet de goede oplossing mogelijk; hier waren meer trappen nodig. Ook bij andere verbindingen tussen twee rivieren kan men daarmee vaak niet volstaan.

De waterscheiding tussen beide rivieren is daarvoor meestal veel te hoog; de ingraving zou te groot worden. Dit is bijvoorbeeld het geval met de Rijn-Main-Donau-verbinding, waarbij het kanaal in vele trappen de waterscheiding bestijgt en daarna weer afdaalt. Een vraagpunt bij dergelijke projecten is hoe groot het verval over een sluis mag zijn. Vroeger waren de verticale sprongen in verband met de beperkte konstruktieve mogelijkheden van schutsluizen erg klein. Dit is thans geen punt meer; vervallen van

25 à 30 m zijn zeer goed uitvoerbaar (Rhône, Tennessee). Aangezien één sluis met groot verval altijd goedkoper is in bouw en bediening dan twee sluizen met klein verval, en ook het wachttijdverlies bij twee sluizen met klein verval altijd groter is dan dat bij één sluis met groot verval, lijkt een minimum aan sluizen het meest aangewezen. Daartegenover staat het grotere grondverzet in de kanaalpanden bij minder sluizen, dus bij grotere trappen. Nog belangrijker is vaak het grote bezwaar dat ontstaat door het niveauverschil tussen kanaalpeil en grondwaterstand. Daarom verdient vooral dit punt grote aandacht bij het zoeken naar de beste oplossing. Hiertoe dient voor elk kanaalpand de horizontale waterspiegel getekend te worden (ook bij een stroomvoerend scheepvaartkanaal zal in verband met de toegelaten geringe stroomsnelheid het kanaalverhang nooit meer dan enkele centimeters per kilometer bedragen). Deze waterstand, het kanaalpeil, hoeft echter niet altijd konstant te zijn.

Variaties in het kanaalpeil kunnen veroorzaakt worden door de waterhuishouding van het kanaal met de aanliggende gronden, door windinvloeden (op- en afwaaiing) of door translatiegolven tengevolge van het vullen of ledigen van sluiskolken. Uiteraard moet bij open kanalen rekening worden gehouden met de waterstandsvariaties in de aansluitende zee, rivier, enz. (open Hartelkanaal).

Perioden van grote aanvoer of gestremde afvoer kunnen verantwoordelijk zijn voor aanzienlijke waterstandsvariaties (op het Noordzee kanaal ongeveer één meter). Daarbij komt nog het vraagstuk van het schut- en lekwater van schutsluizen. Dit zou ten aanzien van aan- en afvoer in evenwicht zijn, indien het aantal schuttingen en het verval van de sluis aan de bovenzijde en de sluis aan de benedenzijde van het kanaalpand gelijk zou zijn. Dit is vaak niet het geval, waardoor bijzondere voorzieningen nodig zijn, zoals spaarbekkens of pompstations, om het kanaalpeil in stand te houden. De kruin van de kanaaldijk wordt bepaald door de eis van stabiliteit van de dijk bij extreem hoge kanaalstand, gekombineerd met extreem hoge golfoploop ten gevolge van scheepvaart. Verder zijn er de kenmerken de onder- en bovenbegrenzingsen, al of niet met berm van de boordvoorziening, waarop hier verder niet wordt ingegaan. Tenslotte is er de ligging van de kanaalbodem. Deze volgt uit de waterdiepte, bepaald volgens de methoden die eerder werden gegeven. Ook hier moeten we rekening houden met de variaties in waterspiegel. Het is echter niet zo, dat de berekende waterdiepte aanwezig moet zijn bij extreem lage kanaalstanden. Bij deze extreem lage waterstanden moet wel scheepvaart mogelijk zijn, waarbij dan de beladingsgraad wordt aangepast.

Windeffekt

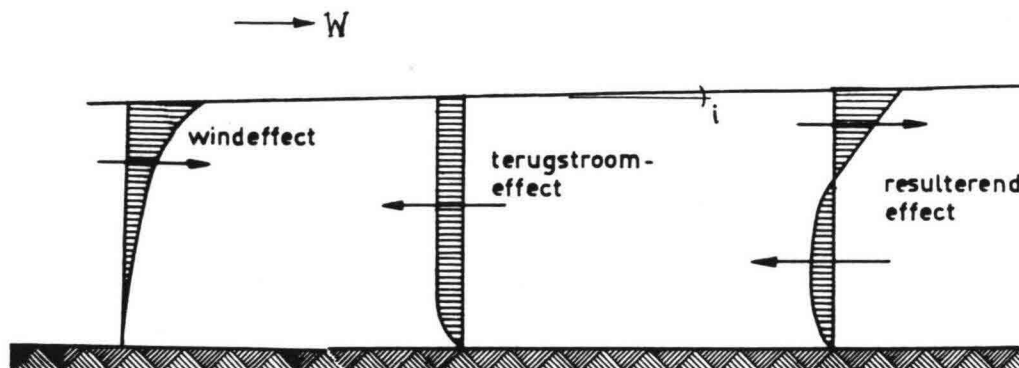
Waterstandsvariaties kunnen ook optreden als gevolg van op- en afwaaiing door windeffekt. De wind die in langsrichting over het kanaal strijkt veroorzaakt een wrijvingskracht langs het wateroppervlak waardoor het oppervlaktewater wordt meegevoerd. Hierdoor daalt het kanaalpeil aan de bovenwindse zijde, doch stijgt aan de benedenwindse zijde. Er ontstaat een tegenverhang, waarbij tenslotte de verhangkracht evenwicht maakt met de wrijvingskracht van de wind. (zie figuur 4.45).

De grootte van de op- en afwaaiing hangt af van de sterkte van de wind (W), en de hoek welke de windrichting maakt met de as van het kanaal (ϕ), de lengte van het kanaal (L), en de diepte (h).

Als formule wordt genomen:

$$z = \alpha \cdot W^2/h \cdot L \cos \phi \quad (119)$$

Hierin stelt α een evenredigheidsfactor voor, $\alpha = 0,2 \cdot 10^{-6}$, waarbij gesteld kan worden dat als zeer hoge windkracht (welke enige tijd moet duren) voor ons land kan worden aangehouden: een windkracht van ca. 9 graden Beaufort (storm) met $W = \text{ca. } 20 \text{ m/s}$.



Figuur 4.45. Waterstandsvariaties ten gevolge van wind

Voorbeeld: Bij een kanaalpand van 10 km lengte en 4 m diepte kan dit een afwaaiing met een bepaald verhang geven van:
 $z = 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 400/4 \cdot 10^4 \cdot 1 = 0.20 \text{ m}$
en $i = z/L = 2 \cdot 10^{-5} (= 2 \text{ cm/km})$.

Uit mededelingen van het Internationale Scheepvaart Congres te Brussel blijkt, dat men maximaal $1 \cdot 10^{-5}$ heeft gemeten. Er is bij dit voorbeeld echter uitgegaan van de zeer ongunstige toestand dat storm samenvalt met de windrichting evenwijdig aan de kanaalas en voldoende lang aanhoudt, zodat de evenwichtssituatie wordt bereikt.

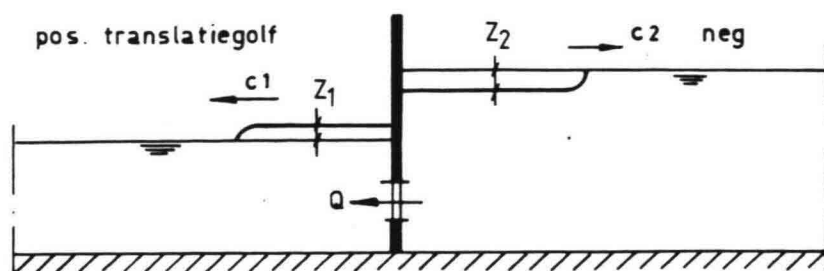
Het vorenstaande kan ertoe leiden dat kanaalpanden niet te lang worden gemaakt en dat een schutsluis wordt geplaatst hoewel deze om andere redenen niet strikt nodig zou zijn.

Translatiegolven

Tenslotte het vraagstuk van de translatiegolven. Deze ontstaan op kanaalpanden bij aanwezigheid van schutsluizen ten gevolge van het legen van de schutkolk (positieve translatiegolf op het benedenliggende pand). Voor een theoretische afleiding wordt verwezen naar de kolleges vloeistofmechanica waar de verschillende verschijnselen zoals voortplanting, demping en terugkaatsing worden behandeld. Translatiegolven kunnen vooral hinder geven voor de scheepvaart op het kanaal en gemeerde schepen langs het kanaal, of in aansluitende havens indien het voorfront van de golf steil is, dat is bij snel toenemend vul- of ledigingsdebiet. Ook voor oever- en bodemverdediging kunnen gevaren ontstaan, vooral in het geval van negatieve translatiegolven en dichte bekledingen (oplichten). Er dient verder rekening te worden gehouden met deze translatiegolven bij het vaststellen van de variaties in waterstand en vaardiepte. Bij het op peil brengen van een schutkolk, wordt er gedurende een relatief korte periode een aanzienlijke hoeveelheid water onttrokken of toegevoegd aan een kanaalpand. Hierdoor worden translatiegolven opgewekt, welke in het eerste geval negatief en in het tweede geval positief zijn. De hoogte van deze zogenaamde "lange" golf is rechtevenredig met de hoeveelheid water welke per tijdseenheid wordt onttrokken of toegevoegd, namelijk (zie figuur 4.46):

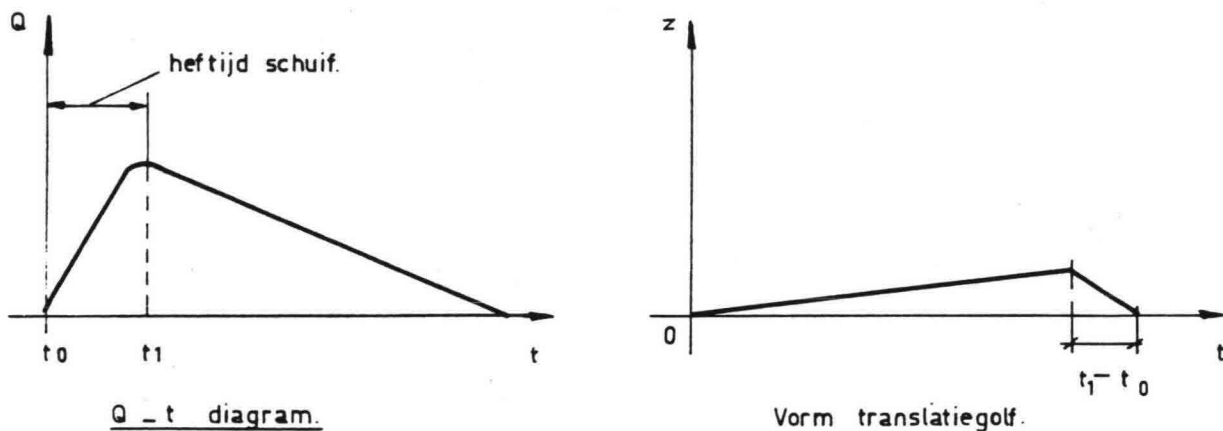
$$z = Q/(B.c) \tag{120}$$

(120)



Figuur 4.46. Positieve en negatieve translatiegolf bij het schutproces

De voortplantingssnelheid (c) van de translatiegolf bedraagt ongeveer \sqrt{gh} , waarin h de gemiddelde diepte van het kanaal voorstelt. De waterspiegelbreedte van het kanaal is B m. Uit bovenstaande volgt, dat z evenals Q een functie van de tijd is. Wanneer de heftijd van de schuif t_1 bedraagt, dan zal op het moment dat de schuif geheel getrokken is de golf de grootste waarde hebben. De vorm van de positieve translatiegolf wordt bepaald door het $Q-t$ -diagram. Hieruit is het $z-t$ -diagram rechtstreeks af te leiden (zie figuur 4.47).



Figuur 4.47. Vorm van de translatiegolf

De helling van de translatiegolf kan, indien deze te groot wordt, gevaar opleveren voor langs de oevers gemeerde schepen. Deze helling dz/dx kan uit vergelijking (120) worden gevonden:

$$dz/dx = 1/(B.c) \cdot dQ/dx \tag{121}$$

Verder geldt dat $dx = c \cdot dt$, waarmee het verhang van de waterspiegel wordt:

$$i = dz/dx = 1/(B.c^2) \cdot dQ/dt \tag{122}$$

Door de wijze van schuifheffing kan men dus de vorm van de translatiegolf binnen de aanvaardbare grenzen houden. De vorm van de translatiegolf zal door diverse oorzaken worden beïnvloed. Aangezien de waterdiepte onder de top van de golf het grootst is, zal deze top de grootste voortplantingssnelheid hebben. Het voorfront van een positieve translatiegolf zal hierdoor steiler worden, terwijl de achterzijde van de golf flauwer zal worden. Door de wrijvingsverliezen zal de golf worden uitgedempt, waardoor zowel voor- als achterkant van de golf flauwer worden.

De afname van de golfhoogte kan worden bepaald met de volgende formule:

$$\Delta(1/H_0) = L / [\psi \cdot C^2/g \cdot R \cdot h] \quad (123)$$

Hierin is: $\Delta(1/H_0)$ = verandering van het quotiënt $1/H_0$
 H_0 = oorspronkelijke golfhoogte (m)
 L = door golf afgelegde afstand (km)
 ψ = coëfficiënt 1 à 1,5
 C = waarde van de Chézy ($m^{1/2}/s$)
 g = versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)
 R = hydraulische straal van het kanaalprofiel (m)
 h = de gemiddelde kanaaldiepte (m)

Voorbeeld:

h	=	4,0 m	per km krijgen we
R	=	3,7 m	$\Delta(1/H_0) = 1 / [3000/10 \cdot 3,7 \cdot 4,0]$
C	=	55 $m^{1/2}/s$	= 0,17
ψ	=	1,33	$1/H_0 = 2,5$
H_0	=	0,40 m	$1/H_0 + \Delta(1/H_0) = 2,5 + 0,17 = 2,67$
			dus $H = 1/2,67 = 0,375$ m

Voor 10 km wordt dit: $2,5 + 1,7 = 4,2$ dus $H = 1/4,2 = 0,24$ m

Tenslotte zal men er bij de bepaling van de bodemhoogte soms rekening mee moeten houden dat aanslibbingen kunnen optreden en dat het wegbaggeren hiervan niet te frekwent moet geschieden ter voorkoming van hinder en extra kosten.

5. NATUURLIJKE SCHEEPVAARTWEGEN

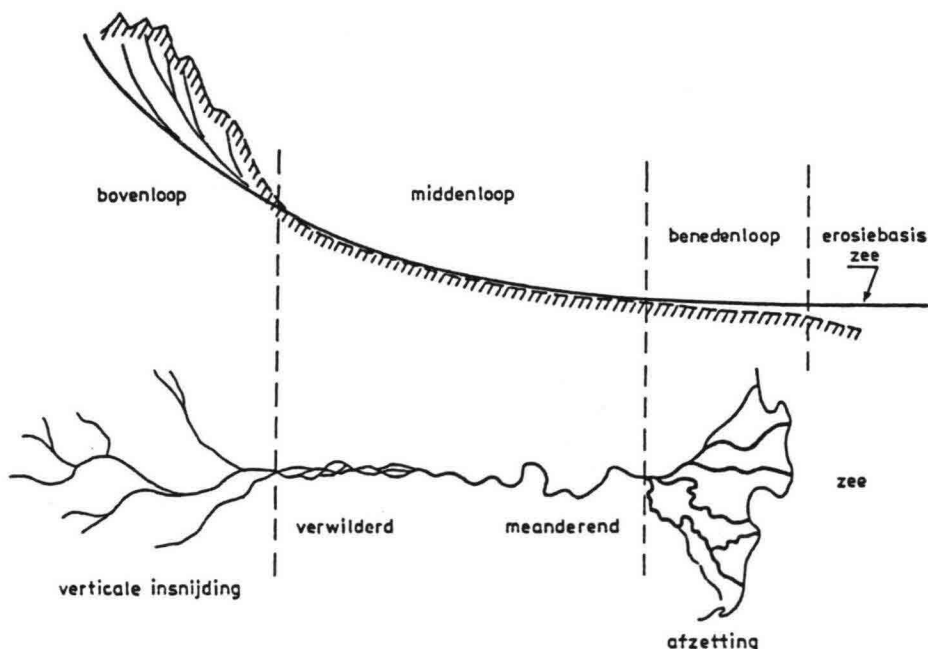
5.1. Inleiding

Een rivier als natuurlijke scheepvaartweg ligt in grote lijnen vast wat betreft zijn tracé en lengteprofiel, dit in tegenstelling tot de kunstmatige scheepvaartweg. Ditzelfde geldt in iets mindere mate voor het dwarsprofiel van een rivier.

Hoewel de natuurlijke (primaire) functie van rivieren het afvoeren van water, sediment en incidenteel ook ijs is, wordt in meerdere mate op indirecte wijze (sekundair) gebruik gemaakt van rivieren ten behoeve van de scheepvaart. Dit laatste vooral door beïnvloeding of zelfs geheel of gedeeltelijke beheersing van de waterstanden.

Dit komt, zoals reeds in hoofdstuk 1 is gemeld, door het feit dat rivieren van nature vaak gegeven vaarwegen bij uitnemendheid zijn, waarlangs de menselijke beschaving met de daarbij behorende industriële ontwikkeling in de loop der eeuwen naar het binnenland is doorgedrongen. Ze vormen tegenwoordig de hartaders van het massaal op gang gekomen scheepvaartverkeer. Zo'n scheepvaartweg stelt echter steeds meer eisen en in natuurlijke staat zijn de meeste rivieren veelal niet zondermeer geschikt als scheepvaartweg.

Ondanks het feit dat er een eindeloze variatie in riviertypen bestaat met een grote diversiteit in afmetingen en kwaliteit, kunnen we toch wel een overzicht geven van de bij de meesten voorkomende eigenschappen en tekortkomingen. We kunnen dat het beste doen door de rivier stroomopgaand te beschouwen.



Figuur 5.1. Geïdealiseerde rivierloop

Hoewel we daarbij de riviermond in zee kunnen weglaten, omdat de binnenscheepvaart, met uitzondering van de (kruiplijn)coaster, deze niet mag passeren, hebben vele rivieren ook mondingen in meren (de Rijn in het Meer van Konstanz, de Gelderse IJssel in het IJsselmeer) die in feite dezelfde problemen kennen als zeemonden. Meestal is de toestand dan iets minder gekompliceerd, omdat er geen getij is, en omdat er meestal slechts één

zandbeweging is (de rivier) en niet zoals bij zee-kusten twee (kust en rivier) kruisende zandtransporten. Ook in dit geval is er sprake van zandneerslag, een uitbouwende delta met als gevolg vertakte en onstabiele geulen met ondiepten vooral bij de uitgang.

Beginnende bij de **benedenrivier** vinden we hier vaak brede watervlakten met golfslag (soms met golven van enige meters), hetgeen voor binnenvaart hinderlijk en soms gevaarlijk kan zijn. In sommige tropische delta's kunnen plotselinge typhonen schuilplaatsen voor de scheepvaart noodzakelijk maken (Ganges delta).

In verschillende vertakte rivierdelta's bevinden zich naast de riviertakken ook **stroomgeulen** (kreeken) welke de takken onderling weer verbinden en waarop eveneens intensief scheepvaartverkeer kan plaatsvinden. In dergelijke kreeken treden vaak zogenaamde **wantijen** op, indien het getijdedelta's betreft. Hier vindt dan de ontmoeting van het getij uit de beide met elkaar verbonden takken plaats, hetgeen inhoudt dat in ideale omstandigheden er geen getijstroom aanwezig is wat tot gevolg heeft dat het meegevoerde slib daar tot bezinking komt, waardoor ondiepten gaan ontstaan. Meestal is dit wantij echter geen gefixeerd punt, omdat de voortplantingssnelheid van de getijen op de takken niet steeds dezelfde waardeverhouding heeft bij elke fase van het getij. Het wantij verplaatst zich daardoor voortdurend, hetgeen dan weer tot afvlakking en verbreding van de ondiepte leidt.

Verder **stroomopwaarts** worden karakter en gebreken van een in haar eigen sediment stromende (alluviale) rivier beheerst door de in de tijd variërende waterafvoer (Q) en de onderlinge verhouding tussen afvoer van vaste stoffen (S) en waterafvoer (Q).

In de benedenloop van grote rivieren is de toestand veelal gunstig: grote waterafvoer en relatief weinig afvoer van vaste stoffen, veelal bestaande uit de fijnere zandfrakties. De gevolgen daarvan zijn flauwe verhangen, kleine stroomsnelheden, grote dwarsprofielen met voldoende diepte in de rivierovergangen en voldoende geulbreedte in de bochten.

Nog verder naar boven gaande wordt de toestand op de rivier steeds ongunstiger. Kleinere Q, grotere S/Q-verhouding en grover materiaal met als gevolg groter verhang, grotere stroomsnelheden, kleinere dwarsprofielen, kleinere diepten op de overgangen, scherpere bochten en smallere bevaarbare geulen in de bochten.

Hoe verder naar boven gaande hoe sterker deze tendens zich doorzet en hoe ongunstiger de toestand voor de scheepvaart wordt: kleinere toelaatbare diepgang voor de schepen, groter benodigd motorvermogen, moeilijker manoeuvreerbaar, kans op uit de bocht lopen bij afvaart, moeilijker om de bocht te doorlopen (zeker bij het passeren van meerdere schepen).

Het geheel wordt verder nog ongunstig beïnvloed door de veelal grote variatie in waterafvoer. Door deze variatie kan een **samengesteld rivierbed** ontstaan met vertakte geulen die elk een kleinere capaciteit en dus kleiner dwarsprofiel hebben dan de onvertakte rivier. In extreme gevallen is er een groot aantal vlechtende geulen, die elk voor zich onbevaarbaar zijn. Na een hoogwaterperiode raken vele geulen sterk verzand, wat vooral in de overgangen speelt. Het uitschuren van deze geulen voltrekt zich slechts langzaam.

Soms ondervindt de scheepvaart die van de hoofdriever een zijrivier op moet varen bij de samenvloeiing problemen ten gevolge van zandbanken die tijdelijk de toegang blokkeren. Oevers en aanlegplaatsen zijn bij dergelijke beweeglijke rivieren vaak tijdelijk onbereikbaar door de ontstane zandbanken, of moeten steeds worden aangepast of verplaatst ten gevolge van oeverafkalving en rivierverlegging.

Daarbij komt ook nog dat verschillende rivieren, die zich in hun midden en bovenloop gedurig verleggen, ware ontbossingen veroorzaken waarbij drijvende, zwevende of over de bodem rollende boomstammen een direkt gevaar kunnen opleveren voor de scheepvaart. Bij tropische rivieren is veelal het oppervlak gedurende bepaalde jaargetijden bedekt met drijvende waterplanten welke eveneens grote hinder voor de scheepvaart kunnen geven.

Een geheel ander soort hinder voor de scheepvaart wordt gevormd door ijsgang of ijsbezetting. Ook zichtbeperking ten gevolge van al of niet hangende mist, en zelfs laag hangende rook (Ruhrgebied) spelen een rol. Tenslotte zijn er dan nog de obstakels in rivieren die gevormd worden door het niet ten volle in haar eigen sediment stromen van de rivier (niet-alluviale riviergedeelten). Plaatselijk boven de bodem uitstekende rotspunten, restanten van grof bodemmateriaal zoals grindbanken en rotsformaties veroorzaken veelal stroomversnellingen. De rotsformaties kunnen zelfs tot volledige watervallen leiden.

Als daar dan nog bijgevoegd worden de door de mens gebouwde objekten over en door de rivier die hinder voor de scheepvaart kunnen opleveren (bruggen, tunnels en kabels) dan is het wel duidelijk dat de mogelijkheden die hinder kunnen opleveren voor de scheepvaart bijna onbegrensd zijn.

De **ontwikkeling van de scheepvaart** zelf op rivieren verschilt nogal sterk per kontinent (zie hoofdstuk 2). Op wat grotere schaal bezien kwamen op vele rivieren in de vorige eeuw de eerste grote raderstoomboten tot ontwikkeling, meestal dienstdoende als gemengd vracht- en passagiersschip. Vergroting van de vrachtkapaciteit werd daarbij veelal gevonden door het langszij nemen van extra bakken. Op de Mississippi groeiden deze min of meer primitieve duwkonvoeien uit tot ware eilanden. Een verdere ontwikkeling bracht het moderne duwkonvooi met invoering van uniforme bakken en steeds efficiëntere duwboten (zie paragraaf 2.6).

Ook in West-Europa is het duwkonvooi tenslotte op de voorgrond gekomen. Een bezwaar van de grote, **stijve duwkonvoeien** zijn de afmetingen, die bij smalle of bochtige, maar ook bij druk bevaren rivieren de afmetingen beperken. Dit is bijvoorbeeld op de Rijn het geval, maar nog sterker op de Maas. De Gelderse IJssel is slechts bevaarbaar voor een éénbakskonvooi. Sleepkonvoeien waren in dat opzicht in het voordeel, omdat zij in een gekromde formatie de bocht beter kunnen doortrekken. Er zijn recent nog pogingen ondernomen om door middel van een zogenaamde knikbesturing dit nadeel voor de duwvaart te verkleinen. Beter lijkt in dat geval het toepassen van koproeren of boegschroeven.

De **verscheidenheid aan schepen**, die de verschillende rivieren bevaren, is groot. Op een rivier als de midden-Mississippi zijn het in hoofdzaak grote duwkonvoeien. Op vele tropische rivieren zijn het voor een groot deel verouderde scheepstypen met een enkel motorschip of duwkonvooi. Op de Rijn zijn het de motorschepen, de duwkonvoeien en nog slechts enkele sleepkonvoeien, maar toch ook nog al wat oudere, al of niet aangepaste, motorschepen. De motorschepen zijn soms speciaal uitgerust als olietankschepen, of voor het vervoer van chemische vloeistoffen, cement enz.; de duwkonvoeien worden in hoofdzaak gebruikt voor het vervoer van kolen, ertsen enz. Naast deze typen binnenschepen varen er vooral op de benedenloop van rivieren steeds meer kleine en soms zelfs grote kustvaartuigen. De kleine kustvaartuigen (inland coasters) hebben ongeveer dezelfde maten als de binnenvaartuigen. Zij zijn enigermate zeewaardig en kunnen sommige kustroutes volgen, zoals de houtschepen van en naar de Oostzee. Daarentegen zijn de oceangoing coasters geheel zeewaardig; zij bevaren alle kusten van de wereld en hun diepte en vaste masthoogte is groter dan van binnenvaartuigen, waardoor zij in vele gevallen niet in staat zijn om ver de rivie-

ren op te varen. Tegenwoordig is daar het zogenaamde zeegaande binnenschip bijgekomen, zoals in hoofdstuk 2 is behandeld.

Natuurlijke scheepvaartwegen munten over het algemeen niet uit in overzichtelijkheid. Rivieren, estuaria en zeegaten hebben vaak een gesplitst geulenstelsel, gescheiden door banken. Bij hogere waterstanden zijn de geulen veelal niet terug te vinden. Zelfs voor ervaren schippers, die het betrokken traject frekvent bevaren, levert dit moeilijkheden op; ook al omdat de geulen onophoudelijk van plaats veranderen en de scheepvaartroute soms van de ene naar de andere geul verlegd moet worden. Des te moeilijker wordt het indien afgelegde rivieren en zeegaten bevaren moeten worden door schepen die er slechts een enkele maal komen.

Reeds vroeg is men begonnen met het verzamelen van nuttige gegevens en informatie. Eerst door de schipper, door de belanghebbende scheepvaartmaatschappij, de scheepvaartverenigingen, en tenslotte ook door de overheid en andere rivier- en havenbeheerders. Van de eerste handleidingen, de maatschappijloodsen en de kleine merktekens is deze informatieve hulp in vele landen van de wereld uitgegroeid tot grote organisaties, die in vele gevallen door de overheid beheerd en bekostigd worden, of waarvoor slechts geringe retributie aan belanghebbenden wordt gevraagd.

Bij de voortgaande ontwikkeling van de scheepvaart op rivieren wordt steeds meer gebruik gemaakt van moderne informatie- en communicatiemiddelen, zoals marifoon, radar en echolood. Deze hulpmiddelen zijn zonder meer nodig bij toepassing van steeds grotere vervoerseenheden, en de daarmee groter wordende vaardiepten op de vervoerswegen. Ook in de ontwikkelingslanden zal men onontkoombaar deze weg moeten inslaan en de kleinere schepen moeten reserveren voor lokaal vervoer. Speciaal voor ontwikkelingslanden geldt, dat de organisatie van het vervoer en de vervoersmiddelen nog veel te wensen overlaat.

5.2. Klassificatie van rivieren

Ook bij rivieren wordt, zoals reeds eerder behandeld, met een klasse-indeling rekening gehouden. Deze **klassificatie** is veel gekompliceerder, omdat ook andere factoren dan scheepsafmetingen van beperkende invloed kunnen zijn. Genoemd worden de volgende factoren:

<u>Beperkend verschijnsel</u>	<u>Klassificatie met betrekking tot</u>
- golfslag	- zeewaardigheid
- stroomsnelheid en verhang	- motorvermogen/tonnage en manoeuvreerbaarheid
- diepte van de vaarweg	- diepgang van het schip
- breedte van de vaarweg	- breedte van het schip
- bochtstraal	- manoeuvreerbaarheid, lengte en breedte van het schip of konvooi
- hoogte en lengte van de kunstwerken	- hoogte en lengte van de schepen
- breedte van de kunstwerken	- breedte van het schip

In de meeste gevallen wordt wat de eigenlijke vaargeul betreft, slechts geklassificeerd naar **diepgang**; met betrekking tot de kunstwerken (bruggen, sluizen, stuwen etc.) ook naar breedte en doorvaarthoogte.

Ook indien alleen naar mogelijke diepgang wordt geklassificeerd is er een grote mate van onzekerheid. Bij kanalen is de diepte van het kanaal vrijwel konstant over de lengte; de waterdiepte is tenminste 30 à 50% groter dan de toegelaten diepgang; dit in verband met bestuurbaarheid, weerstand,

enzovoorts. Bij een rivier met zijn sterke bodemvariaties over de lengte en breedte van de vaarweg wordt de toelaatbare diepgang voor de schepen beheerst door een enkele ondiepte in een bepaald traject, terwijl het op het overige gedeelte van de vaarweg de aanwezige diepte veel groter is. Bovendien varieert deze ondiepte ook nog met de tijd, door al of niet kleine aanzandingen en/of uitschuringen. Voorzichtig en langzaam varend zal een geladen schip een dergelijke ondiepte slechts kunnen passeren met een zeer kleine kielspeling. De maat hiervan is voor de Rijn vastgesteld op circa 30 cm voor grote schepen. In wezen ligt dit echter verschillend voor op- en afvaart. Voor de opvaart moet het schip tenminste de snelheid van het water aanhouden om nog vooruit te komen. Afvarende schepen kunnen theoretisch met de stroom mee drijven, waarbij dan de druk op het roer nagenoeg geheel wegvalt.

Een volgend punt van onzekerheid is de waterstand waarbij deze diepgang mogelijk is. Bij een kanaal is deze waterstand gegeven, zij het dat ook hier kleine fluktuaties kunnen optreden. Bij een rivier zijn er echter de variaties in waterstand ten gevolge van de afvoer (bovenrivier) en de getijbeweging (benedenrivier). Bij welke waterafvoer of welke getijfase moet nu de beschikbare diepte als classificatiediepte worden opgegeven?

Bij een riviertraject op een bovenrivier loopt de waterspiegel ongeveer evenwijdig aan de bodemlijn; de diepten variëren dus met de toe- en afname van de afvoer. Classificatie bij een bepaalde afvoer is dus voldoende; maar welke? En welk referentieniveau moet worden aangenomen? Dit wordt over de gehele wereld verschillend gedaan. Op de Mississippi wordt als referentieniveau aangehouden het gemiddelde van tien waterstanden. Over een tienjarige periode worden jaarlijks de laagste afvoeren overeenkomend met de laagste waterstanden genomen. Op de Rijntakken gebruiken we de zogenaamde Overeengekomen Lage Rivierwaterstand (OLR), dat is de waterstand behorende bij een afvoer die over een periode van 10 jaar 200 (ijsvrije) dagen wordt onderschreden (dus gemiddeld 20 dagen per jaar of ruim 5% van de tijd). Ook op andere rivieren gebruikt men wel dit percentage van 5%, soms ook 10%.

Voor de scheepvaartmaatschappij is er nu het probleem op welke geladen diepgang de schepen moeten worden gebouwd. Worden ze gebouwd op een diepgang die slechts 5% van de tijd onderschreden wordt dan kan het schip vrijwel altijd volbeladen varen. Geeft men het een grotere diepgang, dan kan het schip gedurende een groot deel van het jaar meer lading innemen, maar de rest van de tijd kan het schip dan niet afgeladen worden. Een economisch optimum moet dus worden gezocht, hetgeen alleen te berekenen is als bekend is hoe de frekwentie van de vaardiepte over het gehele jaar is.

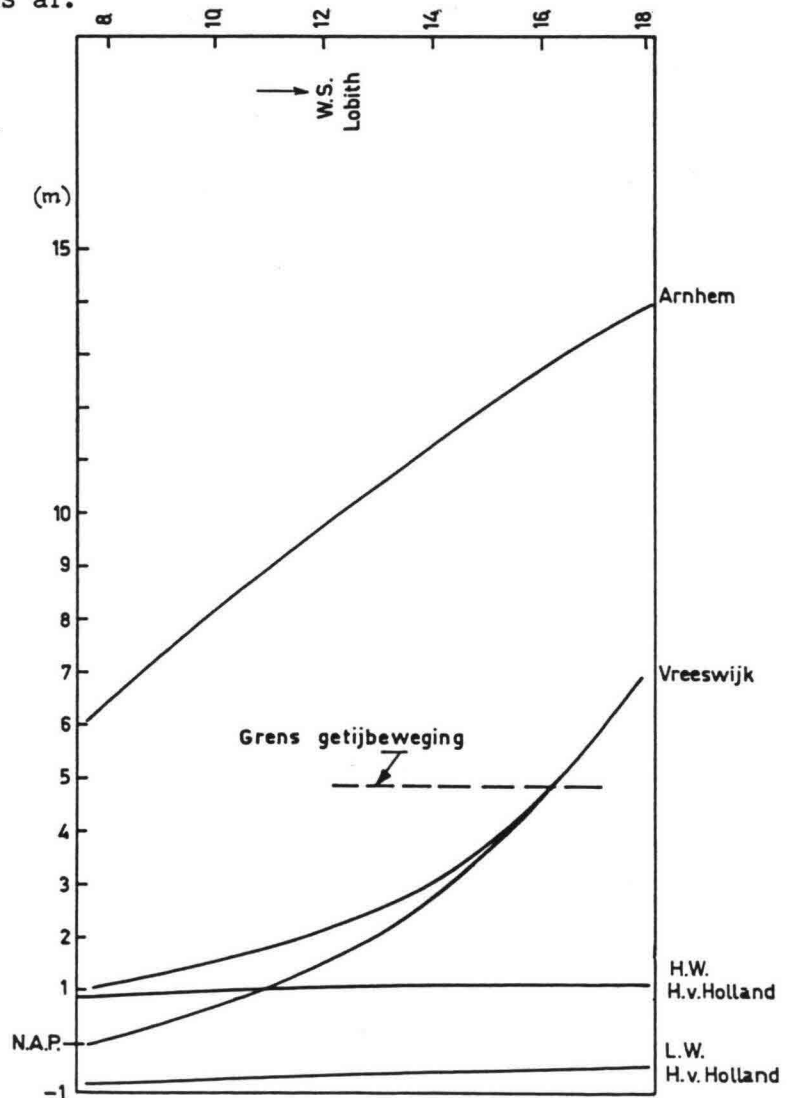
In de estuaria en kustwateren, waar de invloed van bovenrivierafvoeren te verwaarlozen is, neemt men als referentieniveau vaak het Laag Laagwater Spring (LLWS), dat is het gemiddelde van de laagste dag-laagwaters per maand, en dat over een periode van 10 jaar. Dat geeft dan een vlak gaande door de LLWS-standen bij de verschillende peilschalen in een kustgebied. Dit vlak is meestal niet horizontaal, omdat de getijdoordringing niet op alle plaatsen hetzelfde is.

De moeilijkheid is nu om dit referentieniveau te verbinden met het eerder genoemde referentieniveau op de bovenrivier, dus in het gebied waar zowel getij als rivierafvoer invloed hebben. Hiervoor zijn verschillende systemen bedacht; in Nederland is dit het zogenaamde OLW.

OLR en LLWS zijn in wezen twee geheel verschillende zaken. Voor een schipper vormt het een wezenlijk verschil of de bovenrivier gedurende lange achtereenvolgende tijd laagwater geeft en daarmee gepaard gaande een geringe aflaaddiepte, of dat het optreden van een zeer lage zeestand hem slechts enkele uren oponthoud geeft. Daarom is het kennen van vaardiepten

bij OLR en LLWS ten ene male onvoldoende om hierop de diepgang van een schip te kunnen ontwerpen of een verbeteringsplan op te stellen.

Een nadere illustratie van dit probleem vindt men in figuur 5.2, waarin de zogenaamde **betrekkingslijnen** zijn weergegeven. In deze figuur zijn de waterstanden te Lobith (op de verticale as) uitgezet tegen de waterstanden in Arnhem, Vreeswijk en Hoek van Holland (op de horizontale as). We zien nu dat de betrekkingslijnen voor Hoek van Holland (één voor hoogwater en één voor laagwater) vrijwel evenwijdig zijn met de verticale as; er is dus nagenoeg geen korrelatie met de waterstand te Lobith. De betrekkingslijn voor Arnhem wordt weergegeven door een enkelvoudige kromme onder een zekere helling; er bestaat dus een nagenoeg eenduidig verband tussen de waterstanden te Lobith en die te Arnhem. In het overgangsgebied bestaat de betrekkingslijn uit twee takken, welke afhankelijk zijn van het getij. Bij hoge rivierafvoeren, dus hoge waterstanden in Lobith, naderen deze lijnen elkaar en vallen uiteindelijk samen; de invloed van het getij neemt bij hoge rivierafvoeren dus af.



Figuur 5.2. Betrekkingslijnen

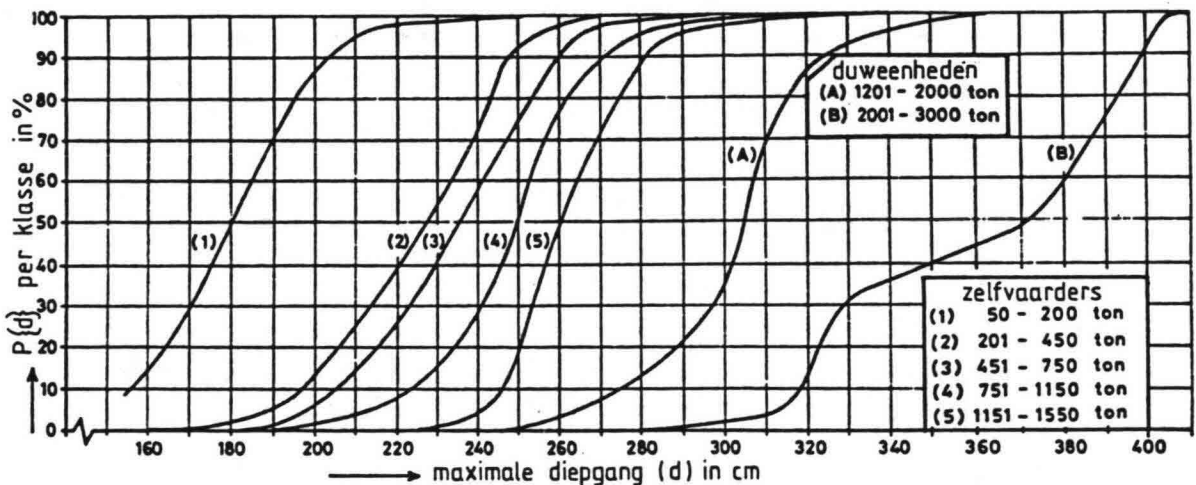
Naast de referentieniveaus welke ten opzichte van NAP zijn gegeven en die tot nu toe zijn genoemd, gebruikt men nog het SP (stuwpeil) bij gekanaliseerde rivieren, en het KP (kanaalpeil) voor kanalen.

5.3. Afmetingen van de schepen

De toe te laten afmetingen van de schepen alsmede de vereiste voortstuwing is sterk afhankelijk van het type te bevaren rivier, de stroomsnelheden en stroomversnellingen, maar ook van de eventueel aansluitende kanalen.

Een bijzonder probleem levert hierbij, zoals reeds eerder besproken, de te kiezen **diepgang** der schepen. De meeste rivieren vertonen een sterke variatie in waterstanden en dus in waterdiepte op de voor de scheepvaart maatgevende ondiepten. Deze waterdiepte kan over het jaar variëren tussen vrijwel nihil tot meer dan 5 m. Hoe groter men dan hierbij de geladen diepgang van het schip kiest, hoe zwaarder het schip wordt en hoe groter de ongeladen diepgang. Bij dit optimalisatievraagstuk spelen vele factoren mee, vooral de wens om ook scheepvaart in de laagwaterperiode, zij het met gedeeltelijke belading, te handhaven. Op de Rijn wordt als diepgang van de schepen een maat van 2,50 à 2,70 m aangehouden, terwijl de streefdiepte voor de Waal 3,50 m bedraagt. In ruim 5% van de tijd is deze diepte dan niet beschikbaar en kan slechts ten dele beladen worden gevaren. Uiteraard is tegenwoordig het streven erop gericht om de ongeladen diepgang van een schip zo klein mogelijk te houden, bijvoorbeeld door het gebruik van lichtmetalen. Bij duwvaart moet de diepgang van de duwboot kleiner zijn dan van de geladen bakken, zodat bij vastvaren de duwboot losgekoppeld kan worden.

Figuur 5.3 geeft informatie over de maximale diepgang van Rijnschepen.



Figuur 5.3. Cumulatieve kansverdeling van de scheepsdiepgang op de Rijn (peildatum 1 januari 1978)

Op scheepvaartkanalen met horizontale bodem wordt zoals in hoofdstuk 4 reeds is behandeld een overdiepte van tenminste 30% aangehouden, dit ter wille van een goede bestuurbaarheid en een geringe vaarweerstand. Hierin zijn begrepen de bij het varen van een schip optredende verschijnselen als trim en inzinking.

Onder trim verstaat men het kantelen van het schip in lengterichting door de verlopende drukverdeling van het onder het schip terugstromende water. Door bij te trimmen, dat wil zeggen door verandering van de gewichtsverdeling over het schip, is dit op te heffen. Dit bijtrimmen doet men alleen bij zeer zware transporten in verband met de ondiepten, waarbij de voor-

kant van het schip zodanig wordt verzwaard dat het schip in stilliggende situatie circa 10 cm voorover ligt. Inzinking van het schip wordt, zoals eerder is behandeld, veroorzaakt doordat de waterspiegel ter plaatse van een varende ten gevolge van de opgewekte retourstroom schip daalt; het schip vaart als het ware in zijn eigen kuil.

In tegenstelling tot een kanaal is in de vaargeul van een rivier de bodem niet evenwijdig aan de waterspiegel. In buitenbochten is de diepte veel groter dan in rivierovergangen. Bovendien zijn het slechts enkele extreem ondiepe overgangen die bepalend zijn voor de scheepvaart. De 30% overdiepte wordt voor deze enkele ondiepten niet toegepast. Bij deze zogenaamde maatgevende ondiepten kan een afvarende schip zelfs met de stroom meedrijvend passeren. Door zijn snelheid ten opzichte van het water tot nul terug te brengen, wordt de spiegel daling en daarmee de inzinking en de trim tot nul gereduceerd. Voor de opvaart ligt dit iets ongunstiger omdat het schip stroomopwaarts moet varen, en wel met een iets grotere vaarsnelheid dan de aanwezige stroomsnelheid, wil het schip zich ten opzichte van de oever verplaatsen. Er zal dus enige retourstroom langs het schip optreden en daardoor enige inzinking ontstaan.

De toepasbare **breedte** van schepen houdt verband met de meest economische vorm van het **grootspant** (dwarsprofiel schip). Het quotiënt breedte—diepte komt daarmee echter in de buurt van 2, wat voor ondiepe wateren een veel te klein schip zou opleveren. In de binnenvaart ligt dit quotiënt daarom dichter in de buurt van 4. Het Europaschip, een veel gebezigd type op onze wateren heeft bij een ladingcapaciteit van 1350 ton afmetingen van 80 x 9,50 x 2,50 m. Een grote duweenheid, bestaande uit 2 x 2 bakken plus duwboot komt op 185 x 22,80 x 3,30 m. Op rivieren met hun relatief grote vaargeulbreedte geven deze breedtematen over het algemeen geen bezwaren. Op een druk bevaren rivier als de Waal, waar schepen met verschillende snelheid varen en waar dus inhaalstroken nodig zijn, zijn de vereiste vaarstroken lang niet overal aanwezig, hetgeen tot bezwaren kan leiden in het bijzonder als door de aanwezigheid van obstakels of plaatsen waarvoor een hogere moeilijkheidsgraad geldt (bochten, kaden, kanaalmondingen) nog verdere hinder wordt veroorzaakt. Dit geldt vooral bij lagere waterstanden. Voor de Waalbocht bij Nijmegen geldt dan dat twee vierbaks duweenheden elkaar niet meer kunnen ontmoeten. Het opvarende konvooi moet dan wachten op het afvarende konvooi. Op een rivier als de Mississippi met plaatselijk zeer scherpe bochten kunnen de vaak zeer lange duwkonvooien soms nauwelijks de bocht zelf passeren.

5.4. De rivier als scheepvaartweg

In de inleiding werd reeds opgemerkt dat bij de binnenscheepvaart de vervoersweg wel in vele gevallen van nature aanwezig is, maar dat deze grote gebreken kan vertonen, waardoor de ontwikkeling van deze categorie van vervoer sterk geremd wordt. Verbetering van de bevaarbaarheid van een rivier is dan ook veelal een voorwaarde voor verdere ontwikkeling van het vervoer.

De ervaring leert echter ook dat **rivierverbeteringen** vaak zeer grote kosten met zich mee brengen, die economisch gezien veelal niet gerechtvaardigd zijn, indien gekeken wordt naar de in de naaste toekomst te verwachten ontwikkeling van het vervoer. Daarom is het, indien mogelijk, aan te bevelen om de rivierverbetering in fasen uit te voeren, waarbij elke fase weer voldoende stimulans geeft voor verdere ontwikkeling van het vervoer.

Informatie aan de scheepvaart

Bij vele rivieren bestaat de **eerste fase** zelfs niet eens uit een verbetering van de vaarweg zelf, maar beperkt zich tot een betere informatie aan de scheepvaart over mogelijkheden en moeilijkheden van de rivier. Vanouds kent men de **loodsboeken** die algemene informatie geven van min of meer permanente aard. Hetzelfde is het geval met **rivierkaarten**. In combinatie met **kilometerborden** langs de rivieroever kan hierdoor algemene informatie worden gegeven. Dit is echter geen actuele informatie. Het publiceren van peilkaarten met gegevens over de ligging, breedte en diepte van de vaargeul heeft over het algemeen geen zin bij rivieren die een variabele ligging van het rivierbed vertonen. Actuele informatie wordt wel gegeven in de vorm van **mededelingborden** langs de rivier, dagelijkse **radioberichten** en gedrukte **bulletins**. Hierin kunnen mededelingen worden gedaan betreffende waterstanden, vaardiepten, wrakken en andere tijdelijke obstakels, verlegde boeien, gedoofde lichten enzovoorts.

De **markering van de vaargeul** is een ander middel tot informatie. Deze markering wordt soms gegeven in de vorm van walbakens die aangeven aan welke oever de vaargeul ligt en waar overgestoken moet worden. Dit bakensysteem is praktisch alleen mogelijk bij een stabiele ligging van een enkelvoudige vaargeul. Een betere markering wordt gegeven door boeien, eventueel verlicht of voorzien van radarreflektoren. Bij het zogenaamde laterale systeem wordt één van de begrenzingen van de vaargeul aangegeven, bij een nauwe vaargeul beide begrenzingen. Dit is het zogenaamde **SIGNI-laterale** systeem voor rivieren; voor het laterale buiten systeem geldt **IALA**.

Tegenover dit scheepvaart aantrekkende systeem van bovenrivieren wordt op brede benedenrivieren het kardinale systeem toegepast, waarbij de ondiepten en andere punten van gevaar worden aangeduid. Het behoort tot de taak van de rivierbeheerder deze informatie te verstrekken, de ligging van de boeien te controleren, etc. In vele gevallen behoort ook tot zijn taak het opruimen van wrakken, van drijvende boomstammen en soms van ijs (Rijn) of van verstoppingen door drijvende planten (Nijl, Congo).

Verbetering van de vaarweg

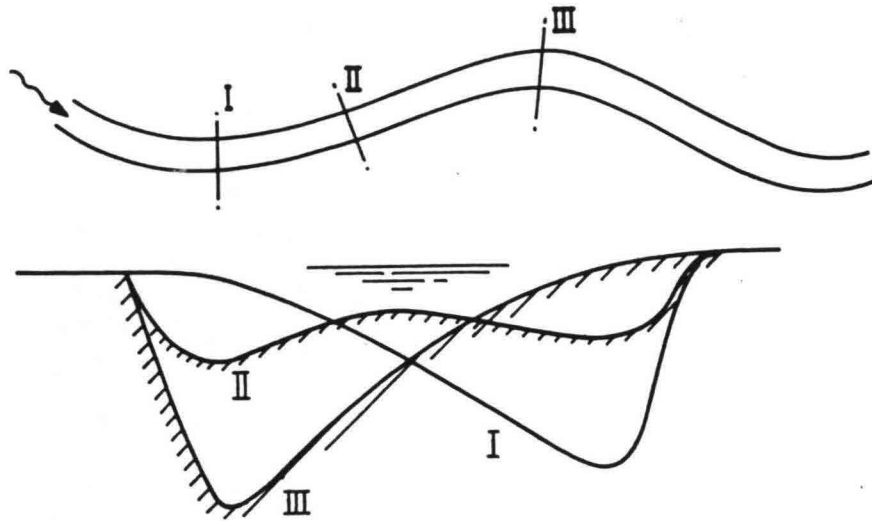
Een volgende fase is meestal het **verbeteren van de bevaarbaarheid**. Een eerste stap in de verbetering van de bevaarbaarheid van alluviale rivieren bestaat vaak in het **periodiek wegbaggeren** van ondiepten. In het volgende wordt nader ingegaan op dit baggeren ten behoeve van de scheepvaart. Voor meer uitgebreide informatie wordt verwezen naar Jansen [78].

a. Periodiek baggeren

Maatgevend voor de bevaarbaarheid van een riviervak zijn meestal een aantal ondiepe rivierovergangen (de zogenaamde **crossings**, zie figuur 5.4). Vooral indien het rivierbed ook nog vertakt is kunnen deze crossings relatief zeer ongunstig zijn. Een enkele maal kan ook de vaargeulbreedte in scherpe bochten de nodige beperkingen opleggen aan de scheepvaart. De toestand wordt verder ongunstig beïnvloed door het optreden van hoogwatergolven.

Tijdens het hoogwater wordt het beeld van het geulenstelsel verstoord, op de riverovergangen treedt aanzanding op, terwijl de geulen in de buitenbochten verder uitschuren, maar soms wel smaller worden door de sterkere dwarshelling van de bodem. Na het passeren van de hoogwatergolf treedt het omgekeerde verschijnsel op, de ondiepten gaan uitschuren en de diepe geulen aanzanden. Maar hierbij treedt een sterke naijling op en de scheepvaart ondervindt hierna spoedig hinder. Door na het hoogwater tijdig een

geul te baggeren door de rivierovergang tussen twee diepe buitenbochten, kan de scheepvaart geholpen worden.



Figuur 5.4. Crossing

Hierbij komen een aantal problemen naar voren. Zo moet na het hoogwater tijdig de vaargeul gepeild worden ter bepaling van de lokatie en de ernst van de te verwachten maatgevende overgangen. De te baggeren hoeveelheden moeten nu worden bepaald. Bij dit laatste zou het van belang zijn om te weten hoe het natuurlijk uitschuringsproces zou verlopen. Dit vraagt echter om een driedimensionale tijdsafhankelijke berekening die nog niet goed mogelijk is. Begint men te vroeg met baggeren, dan kan er nog zoveel sedimenttransport zijn, dat de gebaggerde geul weer aanzandt; is men te laat dan wordt de scheepvaart gestremd. Een volgend probleem is of direct gebaggerd moet worden tot de uiteindelijke diepte bij laagwater, of dat dit beter in etappes kan gebeuren. Als er in een vak een aantal ondiepten aanwezig zijn, welke moet dan de volgorde van baggeren zijn. Hoeveel baggermolens geven een optimaal effect.

Tenslotte is er altijd het economische vraagstuk van de gewenste vaardiepte. Bij een kleine verbetering van de bestaande toestand is het aantal maatgevende punten klein en de te baggeren hoeveelheden gering. Bij een gewenste grotere verbetering neemt het aantal punten toe, maar uiteraard ook de hoeveelheden baggerwerk per punt. Het aantrekkelijke is echter dat bij toename van het scheepvaartverkeer de toestand ook steeds beter kan worden gemaakt; de toenemende kosten zijn dan namelijk verantwoord.

De voordelen van periodiek baggeren als eerste verbetering van een ontwikkelingsrivier zijn groot ten opzichte van andere, meer definitieve, oplossingen. De kosten van baggeren kunnen in het begin klein zijn vergeleken bij de uitvoering van permanente werken. Ook kan een betere kennis van het gedrag van de rivier in de komende jaren worden verkregen. En tenslotte is deze oplossing zeer flexibel. Vooral bij rivieren waar de maatgevende ondiepten in opeenvolgende jaren van plaats kunnen veranderen is deze oplossing aangewezen.

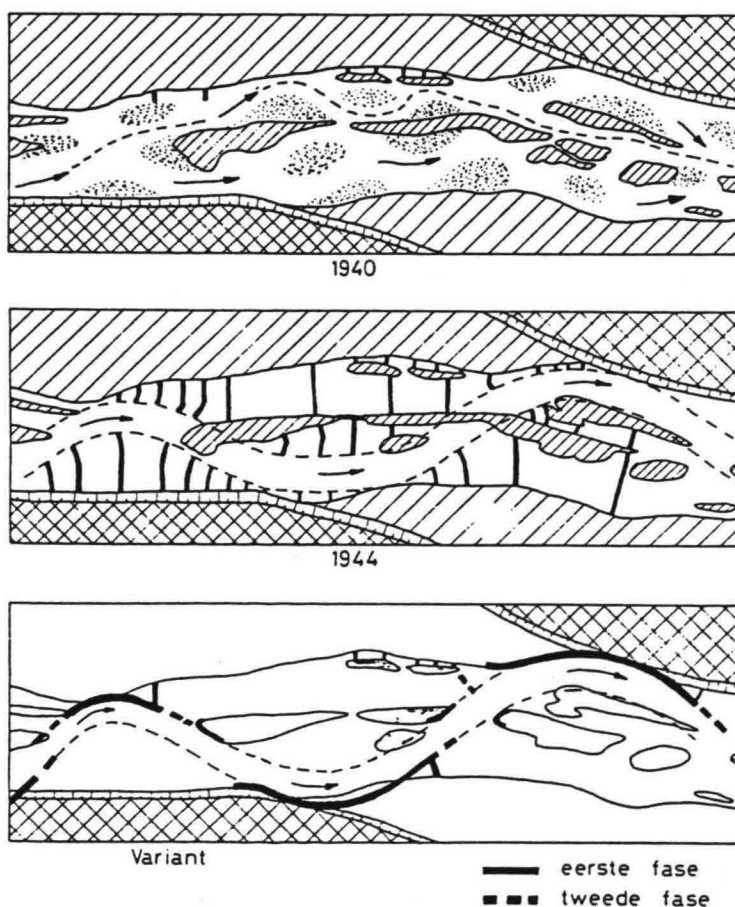
Periodiek baggeren is uitermate aantrekkelijk voor tropische rivieren waarop slechts eenmaal per jaar een hoogwater optreedt. Dit geldt in mindere mate voor depressierivieren met een aantal hoogwaters optredend in variërende maanden. Een eis die altijd gesteld moet worden is dat de organisatie deskundig is en dat over goed meet- en baggergereedschap wordt beschikt.

Bovengenoemd periodiek baggeren dient dus jaarlijks te worden uitgevoerd. Eenmalig baggerwerk wordt soms uitgevoerd bij het afsnijden van scherpe rivierbochten, of ten behoeve van een overbelasting met zand waardoor ongewenste vertakkingen worden afgesloten. Het risico bestaat dat dit geen permanente verbetering geeft als de bochtafsnijdingen niet gelijktijdig worden vastgelegd. Dit laatste behoort echter tot de permanente verbetering van het rivierbed.

b. Permanente bedregulering

Permanente bedregulering is niet alleen een kostbare onderneming, maar kan ook risico's met zich meebrengen: niet zozeer ten aanzien van het eindresultaat, maar meer bij de uitvoering van de werken. Het eindresultaat is veelal te voorspellen aan de hand van een vergelijking met bestaande goede riviervakken in dezelfde rivier. De uitvoering kan echter problemen geven, in het bijzonder bij zeer beweeglijke rivieren. Voert men de werken in een te langzaam tempo uit, dan kan het hele rivierstelsel reeds verschoven zijn voordat een stabilisatie verkregen is. Voert men het werk te snel uit dan zal de rivier de geulen niet zelf kunnen uitschuren, maar moet veel kostbaar baggerwerk worden verricht.

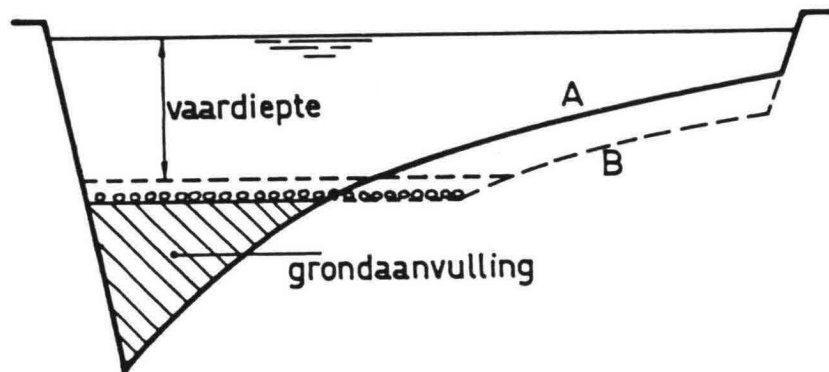
In figuur 5.5 is het voorbeeld gegeven voor de regulering van een riviervak van de Vistula (Weichsel), uitgevoerd in de jaren 1940 - 1943.



Figuur 5.5. Regulering van de Vistula

In dit geval werd de regulering verkregen door de uitbouw van een groot aantal dwarsdammen in het rivierbed. De kruin van deze rijshouten dammen werd even boven de middelbare rivierstand gelegd. Het baggeren werd beperkt tot het wegnemen van slechts enkele eilandgedeelten in het rivierbed. Bij een volgend hoogwater bleek echter de capaciteit van het bed zodanig te zijn afgenomen, dat over de dammen grote vervallen optraden, waardoor vele vernielingen ontstonden. Dit had voorkomen kunnen worden wanneer in de eerste fase zogenaamde langswerken waren aangebracht, die de capaciteit lang niet zo sterk doen afnemen maar wel geulvorming stimuleren (variant in onderste figuur). Na vorming van de nieuwe geul had daarna dan een geleidelijke uitbouw van de reguleringswerken kunnen plaatsvinden (zie gestippelde lijnen).

Een ander voorbeeld betreft de verbetering van de Waal boven Nijmegen. In dit riviervak komen een aantal slechte plaatsen voor. Het ongunstigste is wel de scherpe bocht bij de verkeersbrug van Nijmegen. In een dergelijke scherpe bocht is een sterk bodemdwaarsverhang aanwezig waardoor de vaargeulbreedte sterk beperkt wordt en bovendien hinderlijke dwarsstromingen ontstaan (spiraalstroming). Verschillende mogelijke oplossingen ter verbetering van de toestand zijn onderzocht. Eén daarvan is het opstorten en vervolgens vastleggen van de diepe buitenbocht zoals bijvoorbeeld bij de bocht van Rees in Duitsland is gebeurd (figuur 5.6).



Figuur 5.6. Bochtverbetering bij Rees, Duitsland

Op het eerste gezicht zou men zeggen dat bij een aanvulling zoals in de figuur gegeven is de ligging van de bodem van A naar B zou verschuiven waardoor de vaargeul zou verbreden. Dit is echter niet zondermeer het geval; weliswaar wordt door de profielverkleining de snelheid groter en dus ook de zandtransportcapaciteit; aan de andere kant wordt ook de ontwikkelde breedte waarover zandtransport plaatsvindt kleiner, en dus de hoeveelheid te transporteren zand per m^1 omtrek groter. Door de in het dwarsprofiel horizontale ligging van de opgestorte bodem beweegt het zandtransport zich sneller naar de binnenbocht, waardoor de horizontale bestorting in de buitenbocht kaal blijft zonder doorgaand zandtransport. Bij de bocht van Rees in Duitsland is een min of meer aanvaardbare oplossing verkregen door toepassing van kribben in de binnenbocht. Toch moet er nog steeds baggerwerk in de binnenbocht worden verricht om de gewenste breedte te verkrijgen.

De meest radikale oplossing is uiteraard een grote serie bochtafsnijdingen tussen Nijmegen en het Pannerdens kanaal, wat echter zeer duur is en waarbij waardevolle natuurgebieden opgeofferd zouden moeten worden. De bocht van Nijmegen zou daardoor echter wel veel minder sterk gekromd kunnen worden. Een dergelijke bochtafsnijding is vooral van belang wegens de onoverzichtelijkheid die bij de huidige situatie aanwezig is juist bovenstrooms van twee in de bocht gelegen bruggen over de Waal. Door de bochtafsnijding zou de waterstand juist beneden de splitsing van de Bovenrijn in Waal en Pannerdens kanaal op den duur sterk naar beneden gaan. Dit zou de water- en zandverdeling over de beide takken sterk gaan beïnvloeden, waarbij door het toegenomen verhang in de Waal de zandtransportcapaciteit zou gaan toenemen. Om dit te voorkomen zijn plannen gemaakt waarbij een steenbestorting op de bodem wordt aangebracht met een tweeledige functie, namelijk het vastleggen van de bodem en het verhogen van de ruwheid. Door het verhogen van de ruwheid zal het verhang toenemen, waardoor de waterstand bij het splitsingspunt op het oude niveau gehandhaafd kan blijven; de water- en zandverdeling over de beide takken wordt dan niet beïnvloed.

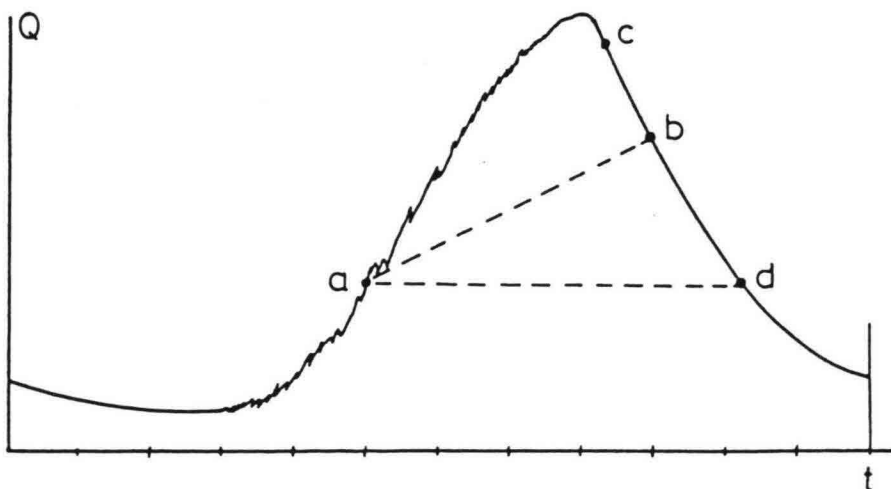
Bedregulering is tegenwoordig alleen nog maar aantrekkelijk als andere belangen hierom vragen (haven, waterinlaat, brug e.d.) of als het gaat om een sterk meanderende of vlechtende rivier. Zo niet dan is de volgende fase na het periodiek baggeren meestal de afvoerregulering of de kanalisatie.

c. Afvoerregulering

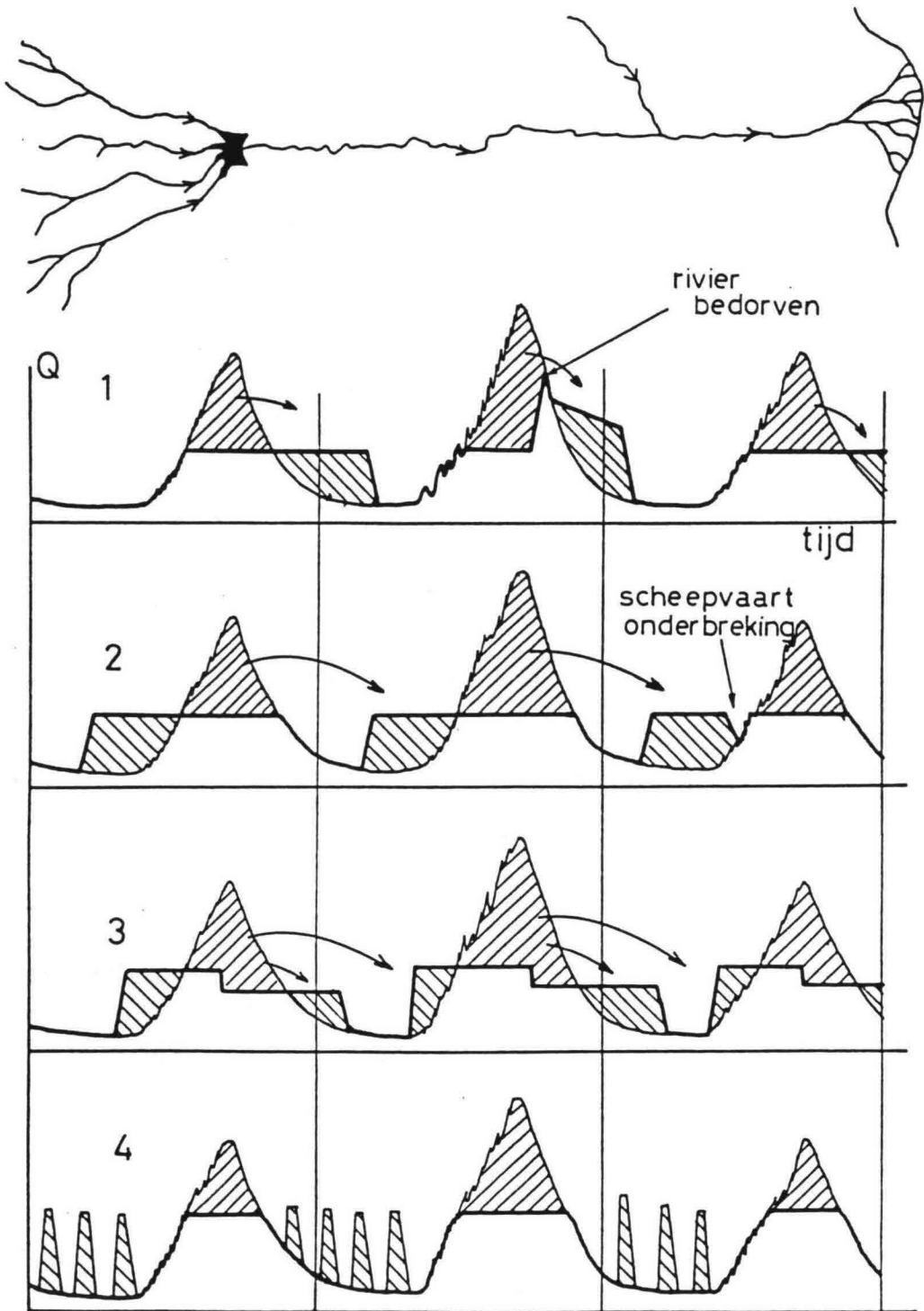
Afvoerregulering kan in enkele gevallen een aantrekkelijke oplossing geven voor de verbetering van de scheepvaart, maar dan moet wel aan enige voorwaarden worden voldaan.

In de eerste plaats dient de gemiddelde jaarafvoer in een vrij droog jaar zo groot te zijn, dat daarbij de rivier bevaarbaar is.

In de tweede plaats moet voldoende reservoir berging bovenstrooms van de scheepvaartroute aanwezig zijn om een vrij grote hoogwatergolf te kunnen bergen. Aftopping van een hoogwatergolf door berging biedt altijd voordeel voor de scheepvaart; in figuur 5.7 wordt dit nader geïllustreerd.



Figuur 5.7. Afvoerverlooptlijn en bevaarbaarheid



Figuur 5.8. Methoden van een reservoirlediging

Bij de afvoerverlooptlijn van de tropische rivier met één hoogwatergolf per jaar wordt de rivier bevaarbaar bij punt a. Na het passeren van de golf is het geulenstelsel bedorven en wordt de rivier onbevaarbaar bij b. In werkelijkheid zal de scheepvaart reeds eerder verdwijnen (c) teneinde het risico te ontgaan om vast te lopen en tot het volgende regenseizoen op de zandbank te blijven zitten.

Vangt men de hoogwatergolf volledig op, wat om een zeer groot reservoir vraagt, dan zal het geulenstelsel van de rivier door de min of meer gelijkmatige afvoer niet veel meer veranderen en kan men varen tot tijdstip d. In werkelijkheid zal het resultaat meestal niet zo gunstig zijn omdat of de hele golf niet kan worden geborgen, of omdat benedenstrooms zijrivieren aanwezig zijn die het beoogde effect weer verminderen. Een punt van belang is op welk ogenblik het in het reservoir verzamelde water dient te worden geloosd. In figuur 5.8 is dit nader aangegeven.

- Bij de eerste, meest gebruikelijke methode wordt het reservoir geleid na de hoogwatergolf; scheepvaart blijft dus mogelijk tot het reservoir leeg is. Voordelen: geen verlies door verdamping en exact te voorspellen wanneer de bevaarbaarheid eindigt. Een nadeel bij relatief kleine reservoirs is dat indien het reservoir vol is voor het einde van de golf het geulenstelsel van de rivier benedenstrooms toch ten dele bedorven wordt, en een grotere hoeveelheid water moet worden afgelaten voor eenzelfde bevaarbaarheid.
- Bij de tweede methode houdt men het water in het reservoir tot het volgend jaar. De rivierovergangen hebben zich dan hersteld en de benodigde afvoer kan kleiner zijn. Een tweede voordeel hierbij kan zijn dat voor de regentijd de oogst moet worden afgevoerd en men een bevaarbare rivier wenst. Indien echter de regentijd onverwacht laat valt kan het reservoir voortijdig leeg zijn, waardoor een onderbreking van de scheepvaart kan optreden. Een tweede bezwaar geeft het verdampingsverlies door de lange verblijftijd in het reservoir.
- De derde methode is een mengvorm van de eerste en tweede. Hierbij is de bevaarbaarheid aangepast aan de behoefte.
- Tenslotte de vierde methode toegepast bij kleine reservoirs zoals in de rivier de Weser en de Vistula. Het water wordt hierbij in een aantal golven afgelaten. Op het front van deze golven, die zich voortplanten met een snelheid die wat kleiner is dan de mogelijke scheepssnelheid, kunnen de geladen schepen stroomafwaarts meevaren. Dit systeem is uiteraard alleen mogelijk voor rivieren waarbij geen geladen opvaart in deze periode van het jaar voorkomt.

Reservoirs zijn kostbaar en, indien technisch al mogelijk, meestal economisch alleen verantwoord indien gekoppeld met andere belangen zoals bij multi-purpose-projecten gebruikelijk is.

d. Kanalisisatie

Eveneens een kostbare, maar wel de meest afdoende oplossing voor de verbetering van de scheepvaart op een rivier is de waterstandsbeheersing, de zogenaamde **kanalisisatie** met behulp van stuwen met daarnaast gelegen schutsluizen. Deze methode is technisch altijd mogelijk, al zal men bij een extreem geval, namelijk de droogvallende rivier, water moeten terugpompen. Kanalisisatie van een rivier gaat gepaard met weinig of geen risico; een goed resultaat is bijna altijd verzekerd, al zal men wel eerst de vele problemen die zich hierbij voor kunnen doen onder ogen moeten zien. In het diktaat Rivieren (f8N) wordt in dit verband als voorbeeld de kanalisisatie van de Nederrijn behandeld.

Ook bij kanalisatie van een rivier zal men indien even mogelijk proberen om meer belangen tegelijk te dienen, bijvoorbeeld waterkracht in combinatie met scheepvaart.

In de inleiding werd reeds vermeld dat een hoofdbezwaar van riviertransport de door de rivier voorgeschreven route is. Overslag en verder gebruik van andere transportmiddelen is dan ook veelal vereist.

In landen met veel riviertransport heeft men dit bezwaar verminderd door de aanleg van aansluitende scheepvaartkanalen (zie hoofdstuk 4). Dergelijke kanalen kunnen de verbinding vormen tussen een rivier en een industriegebied, bevolkingsconcentratie of haven. Soms worden ook wel twee scheepvaartrivieren met elkaar verbonden (Rijn-Donau). Een enkele maal wordt zelfs een kanaal parallel aan een rivier aangelegd ter vervanging van een slecht te verbeteren riviervak (Julianakanaal). In een dergelijk kanaal bevinden zich veelal meerdere schutsluizen, waardoor de waterspiegel niet te veel af hoeft te wijken van de grondwaterstand. Bij de aansluiting van een kanaal op een rivier is meestal een schutsluis nodig om te voorkomen dat de vaak sterk variërende waterstanden op de rivier kunnen doordringen in het kanaal, waardoor hoge kanaaldijken noodzakelijk zouden worden.

5.5. Rivierhavens en aanlegplaatsen

Hoewel een deel van de schepen de rivier op kan varen of deze kan verlaten via de eerder genoemde kanalen, zal in de meeste gevallen toch overslag moeten plaatsvinden in langs de rivier gelegen rivierhavens, alwaar het riviertransport aansluiting vindt op weg- en/of spoorwegtransport, of op direkt langs de rivier gelegen industrieën. Deze zogenaamde **vervoersknoop-**punten kunnen de vorm hebben van direkt langs de rivier gelegen aanlegplaatsen, of meer landinwaarts gelegen havenbassins, die via een kanaal verbonden zijn met de rivier. Voor uitgebreide informatie wordt hiervoor verwezen naar Verkerk [79 en 80].

In een eerste fase worden **aanleg- en overslagplaatsen** veelal direkt langs de oever toegepast. Uiteraard wordt zo mogelijk een plaats uitgezocht waar de oever van nature vastligt, met een stabiele geul langs de oever. Maar deze gunstige toestand is niet steeds aanwezig. Soms treft men nog zeer primitieve toestanden aan, waarbij de afkalvende hoge oever van een buitenbocht de scheiding vormt tussen de tegen de wal liggende schepen en parallel op de oever gelegen provisorische wegen of spoorwegen. Aangezien een dergelijk overslagpunt wegens erosie of geulverlegging nogal eens verplaatst moet worden, is het niet verantwoord om hier dure permanente overslag- en bufferinstallaties te maken.

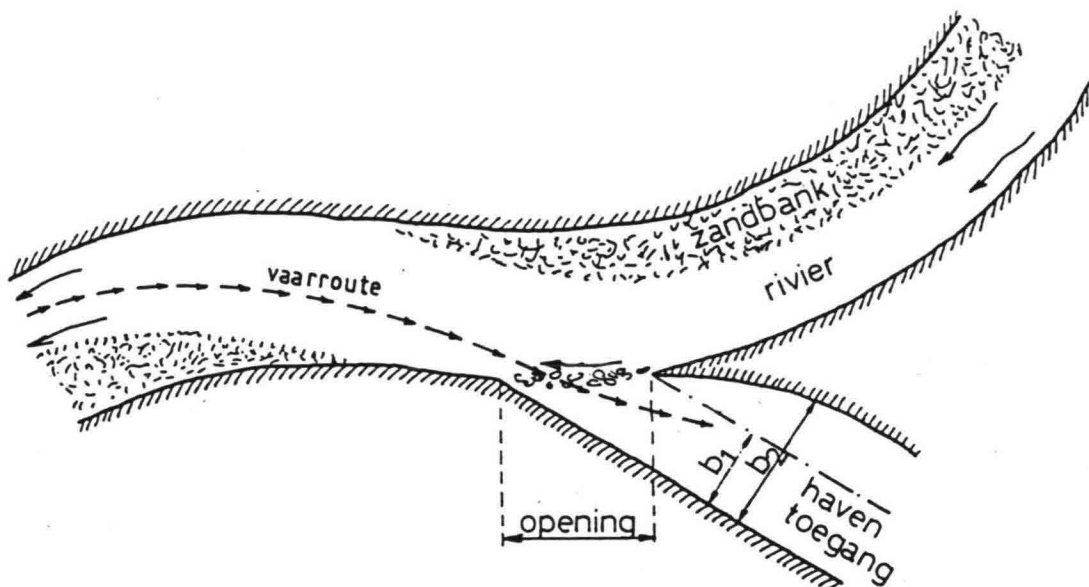
Overigens bestaan ook tegen stabiele aanlegplaatsen nogal wat bezwaren. De oever moet vrijwel hoogwatervrij zijn, hetgeen de overslag minder efficiënt maakt. De direkte invloed van het stromende water, passerende schepen, drijvende materialen, ijs, enz. kunnen grote bezwaren voor de overslag opleveren. Bij de keuze voor een aanlegplaats is een diepe buitenbocht veelal gewenst, waardoor de lengte beperkt wordt maar altijd nog zo groot is dat een onoverzichtelijke en inefficiënte overslag kan ontstaan.

Bij een alluviale rivier is **fixatie van de rivier** gewenst, niet alleen ter plaatse van de aanlegplaats, maar ook bovenstrooms ervan om een stabiele ligging van de geul te kunnen waarborgen. Dit kan bijzonder kostbaar worden.

Hetzelfde is het geval met de **toegang van een binnenhaven**. Bij toepassing van een rivierhaven kan deze toegang open of met een schutsluis afgesloten zijn. De laatste mogelijkheid heeft het grote voordeel dat een konstant peil in de haven kan worden gerealiseerd. De hoogte van de kade wordt dan bepaald door dit gekozen peil en hoeft niet hoogwatervrij te zijn, zoals wel bij de mogelijkheid van een open haven het geval is. De overslag kan

daardoor efficiënter gebeuren dan bij een open haven met enerzijds hoge kaden en anderzijds extreem lage waterstanden.

Een ander probleem van de haventoeegang vormt de ligging ten opzichte van de rivier en de doorvaartbreedte van de aansluiting op de rivier. Een juiste oplossing moet èn goed toegankelijk zijn voor de scheepvaart, dus liefst ruim, en slecht toegankelijk voor binnentredend sediment, dus liefst nauw. Deze tegenstrijdigheid vraagt om een kompromis-oplossing. In figuur 5.9 is een oplossing gegeven die voor opvarende schepen aantrekkelijk is.



Figuur 5.9. Haventoeegang voor opvarende schepen

De toegang wordt hierbij gelegd aan het benedenstroomse einde van een buitenbocht waarbij de toegangsecul wijst in stroomafwaartse richting, zodat de opvarende scheepvaart praktisch geen problemen ondervindt. Bij het binnenvaren valt de druk van het stromende water op het voorschip weg, zodat rotatie kan optreden. Een kanaalverbreding direkt achter de opening, zoals aangegeven, geeft dan voordelen. Bij deze oplossing moet de afvaart wel eerst op de rivier benedenstrooms van de toegang keren om te kunnen binnenvaren.

Zou men de afvaart ook direkt willen laten binnenvaren, dan zou de opening groter moeten worden en de toegangsecul meer haaks op de rivier moeten komen te liggen. Dit heeft tenslotte tot de in Nederland ontwikkelde eivormige toegangen geleid, zoals besproken in het diktaat Rivieren (f8N). De door de rivier aangedreven neer in deze ellipsvormige opening zorgt voor ondersteuning van de stroom in de rivier. Hierdoor wordt het uitbui- gen van de stroombanen en de daarmee gepaard gaande stroomvertraging met aanzanding voor de mond beperkt. De overgang tussen de rivier- en de neer- stroom moet terwille van het bestrijden van sedimentatie door uitwisseling in de mond zo scherp mogelijk worden uitgevoerd, om een smalle wervel- straat te verkrijgen. Dit kan bijvoorbeeld met behulp van een damwand- scherm. Een wervelstraat is echter nooit stabiel; altijd treden er wel slingeringen op waarbij afwisselend water en zwevend sediment in en uit de haven stroomt. Door bezinking treedt aanslibbing op meer naar binnen toe. Een scherpe overgang tussen rivier en neer is echter voor de scheepvaart weer niet zo aantrekkelijk, omdat bij het binnenvaren, ook bij snel reage- ren van de stuurman, toch een zekere rotatie van het schip optreedt.

De overslag in de vervoersknooppunten geschiedt bij primitieve toestanden nog wel met de hand. Bij verdere ontwikkeling komen echter de moderne overslagmethoden in aanmerking, waarbij steeds meer differentiatie gaat optreden in de toe te passen werktuigen. Hiervoor en voor andere onderdelen, zoals buffers, aansluiting op spoor- en wegvervoer enz. kan worden verwezen naar het diktaat Havens (f12N) uit de collegereeks Havens en Scheepvaartwegen.

Literatuur

- [1] Krietemeijer, J.H.
Binnenscheepvaart
Kollegediktaat s3
TH Delft, afdeling Maritieme Techniek, 1974.
- [2] Afdelingen Bouwkunde, Civiele Techniek en Geodesie
Watersport
Kollegediktaat H26B
TH Delft, maart 1979.
- [3] Stijnen, P.
Binnenscheepvaart
Koncept kollegediktaat
TH Delft, afdeling Maritieme Techniek, vakgroep Werfinrichting en
Werfbedrijf, 1984.
- [4] Thiel, J.J.
Berechnung der Potentialströmung um ein Schiff bei Kanalfahrt
Dissertatie TH Aachen, augustus 1974.
- [5] Waterloopkundig Laboratorium
Tweedimensionale berekening van de waterbeweging rond een varend
schip
Rapport M 1115, informatie 22, augustus 1978.
- [6] Thiele, A.
Schiffswiderstand auf Canalen
Cantrallblatt der Bauverwaltung No. 56, 1901, pp 345-347.
- [7] Krey, H.
Fahrt der Schiffe auf Beschränktem Wasser
Schiffbau, 1913, nrs 12, 13, 14, 15, 16 en 17.
- [8] Kreitner, J.
Über den Schiffswiderstand auf Beschränktem Wasser
Werft-Reederei-Hafen 7, 1934, Heft 7.
- [9] Schijf, J.B.
Rapport voor XVIIth International Navigation Congress
Lisbon 1949, S.I.-C.2.
- [10] Jansen, P.Ph. en Schijf, J.B.
Paper voor XVIIIth International Navigation Congress
Rome 1953, S.I.-C.1.
- [11] Waterloopkundig Laboratorium Delft
Verschijnselen bij de vaart van één of twee schepen in een kanaal
Rapport M 415, 1953.
- [12] Constantine, T.
On the movement of ships in restricted waterways
Journal of Fluid Mechanics, vol. II part 2, okt. 1960, pp 247-256.

- [13] Constantine, T.
The behaviour of ships moving in restricted waterways
Proc. of the Institution of Civil Engineers, London, vol.19, aug.
1961, pp 549-561.
- [14] Hughes, G.
Tank boundary effects on model resistance
Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, 1961, pp
421-440.
- [15] Tothill, J.T.
Ships in restricted channels - a correlation of model test, field
measurements and theory
Marine Technology, april 1967, pp 111-128.
- [16] McNowen, J.S.
Sinkage and resistance for ships in channels
Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division
ASCE, vol. 102, WW 3, paper 12291, aug. 1976, pp 287-300.
- [17] Belanin, V.V. and Bykov, L.S.
Selection of leading dimensions of navigation canal sections and
modern method of bankprotection
XXIth International Navigation Congress, Stockholm 1965, SI-4, pp
151-169.
- [18] Gates, E.T. and Herbich, J.B.
The squat phenomenon and related effects of channel geometry
Hydraulics in the Coastal zone, proceedings 25th Annual hydraulics
division speciality conference, New York 1977, pp 236-244.
- [19] Graewe, H.
Die Querschnittsgröße eines wasserführenden Groszschiffahrtkanals
Die Wasserwirtschaft 1, 1966, pp 9-17.
- [20] Francis, J.R.D.
A further note on the speed of Floating Bodies in a stream
Journal of Fluid Mechanics 10, 1965.
- [21] Waterloopkundig Laboratorium Delft
Aantasting van dwarsprofielen in Vaarwegen,
deel I: Schelde-Rijn-verbinding
Rapport M 1115-I, 1974.
- [22] Sturtzel, W. e.a.
Untersuchungen der in stehenden und strömenden Wasser festgestellten
Anderungen des Schiffswiderstandes durch Druckmessungen
Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen nr. 618, 1958.
- [23] Conradie, J.S.
De ééndimensionale retourstroomtheorie - Een algemeen overzicht
Afstudeerverslag vakgroep Waterbouwkunde, TH Delft, 1982.
- [24] Sharp, B.B. and Fenton, J.D.
A model investigation of squat
Dock and Harbor Authority no. 577, nov. 1968, pp 242-244.

- [25] Bouwmeester, J.
Calculation return flow and water level depressions; new method
XXIVth International Navigation Congress, Leningrad 1977, SI-3, pp
148-151.
- [26] Tuck, E.O.
Shallow water flows past slender bodies
Journal of Fluid Mechanics, vol. 26 part 1, 1966, pp 81-95.
- [27] Huuska, O.
On the evaluation of underkeel clearance in Finnisch Waterways
Otaniemi, Helsinki University of Technology, Report no. 9, 1976.
- [28] Barras, C.B.
The phenomena of ship squat
International Shipbuilding Congress, no. 26, 1979, pp 44-47.
- [29] Soukhomel G.I. and Zass, V.M.
Abaissement du navire en marche
Navires, Port et Chantiers, jan. 1958, pp 18-23.
- [30] Dand, I.W.
Full form ships in shallow water: some methods for the prediction of
squat in subcritical flows
Teddington (UK), National Physical Laboratory, Report no. 160, jan.
1972.
- [31] Führer, M. and Römisch, K.
Effects of modern ship traffic on inland- and ocean-waterways and
their structures
PIANC XXIV, Leningrad 1977, SI-3, pp 79-93.
- [32] Raven, H.
De extrapolatie van de viskeuze weerstand van een schip in onbeperkt
water
Wageningen, MSP rapport 0 3336-1-SR, 1980.
- [33] Hughes, G.
Friction and form resistance in turbulent flow, and a proposed
formulation for use in model and ship correlation
Trans. INA, vol. 96, 1954.
- [34] Kaa, E.J. van de
Power and speed of push-tows in canals
Procs. Symp. "Aspects of Navigability" vol. 3, paper 16, Delft,
1978.
- [35] Graewe, H.
Der Zweckmässige Querschnitt von Binnenschiffahrtskanälen der
Wasserstrassenklasse IV (dissertatie)
TH Aken, 1967.
- [36] Constock, J.P.
Principals of Naval Architecture
New York, SNAME, 1967.

- [37] Schlichting, H.
Boundary layer Theory
Karlsruhe, 1955.
- [38] Blaauw, H.G. and Knaap, F.C.M. van der
Prediction of squat of ships sailing in restricted water
8th International Harbour Congress, Antwerpen, juni 1983.
- [39] Waterloopkundig Laboratorium Delft
Aantasting van Dwarsprofielen in Vaarwegen
deel IV: Meetresultaten fysisch onderzoek
Verslag M 1115-IV, 1983.
- [40] Waterloopkundig Laboratorium Delft
Aantasting van Dwarsprofielen in Vaarwegen
deel XI-C: Analyse meetresultaten prototypeproeven Hartelkanaal
Verslag M 1115-11c, 1983.
- [41] Bouwmeester, J.
Hydraulische verschijnselen in scheepvaartkanalen
deel III: Modelonderzoek in Waterloopkundig Laboratorium naar
hydraulische verschijnselen in scheepvaartkanalen
TH Delft, juni 1971.
- [42] Kelvin, W.T.
Stationary Waves in Floting Water
Philosophical Magazine, London 1886.
- [43] Kelvin, W.T.
On ship waves
Proceedings, Inst. of Mech. Engineers, London 1887.
- [44] Kelvin, W.T.
Deep water ship waves
Proceedings Royal Society of Edinburgh, Scotland 1904.
- [45] Ursell, F.
On Kelvin's ship-wave pattern
Journal of Fluid Mechanics, Vol. 8 part 3, London 1960.
- [46] Johnson, J.W.
Ship waves in navigation channels
Proceedings 6th Conference on Coastal Engineering, California 1958.
- [47] Sorensen, R.M.
Investigation of ship-generated waves
Journal of the Waterways and Harbors Division, February 1967.
- [48] Sorensen, R.M.
Waves generated by Model Ship Hull
Journal of the Waterways and Harbors Division, November 1969.
- [49] Lamb, H.
Hydronamics
Dover Publications, 6th Edition, New York, 1932.

- [50] Havelock, T.H.
The propagation of Groups of Waves in dispersive media, with application to waves on water produced by a Travelling Disturbance
Proceedings Royal Society of London, 1908.
- [51] Gates, E.T. and Herbich, J.B.
Mathematical model to predict the behaviour of deep-draft vessels in restricted waterways
Texas A and M University, Sea Grant College, Report TA MU-SG-77-206, 1977.
- [52] Dass, M.M.
Relative effect of waves generated by large ships and small boats in restricted waterways
University of California, Hydr. Eng. Laboratory, Report HEL-12-9, Berkely, USA 1969.
- [53] Sorenson, R.M.
Ship waves
University of California, Hydr. Eng. Laboratory, Report HEL-12-2, Berkely, USA 1966.
- [54] Schüle, E.
Untersuchung des stationären und instationären Verhaltens von grossen Binnenmotorschiffen auf flachem seitlich begrenzten Fahrwasser bei erheblich eingeschränkten Wassertiefen-, Tiefgangs- und Querschnittsverhältnissen
Schiff und Hafen/Kommandobrücke, Heft 6/1982, 34 Jahrgang, pp 67-73.
- [55] Diverse auteurs
Nieuwe inzichten in het ontwerpen van oeverbescherminingsconstructies
KIVI-symposium 25 mei 1983.
- [56] Blaauw, H.G. and Kaa, E.J. van de
Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw-race of manoeuvring ships
Delft Hydraulics Laboratory, Publ. 202, 1978.
- [57] Verhey, H.J.
The stability of bottom and banks subjected to the velocities in the propellor jet behind ships
8th International Harbour Congress, Antwerpen, juni 1983.
- [58] Rajaratnam, N.
Erosion of sand beds by submerged impinging circular turbulent water jets
University of Alberta, Dept. of Civil Engineering, Technical Report WRE 81-1, Edmonton, Canada 1981.
- [59] Lodder, G.C.
De geschiedenis van het net van scheepvaartkanalen in Nederland
PT Bouwkunde, wegen- en waterbouwkunde, jaargang 32 nr. 3, maart 1977.
- [60] Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Ministerie van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening
Struktuurschema Vaarwegen, deel a: beleidsvoornemen
Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage, 1977.

- [61] Commissie Vaarwegbeheerders
Maatgevende schepen ten behoeve van richtlijnen vaarwegen CEMT
klasse I t/m IV
Juli 1980.
- [62] Werkgroep Vaarwegvakken
Normen voor het dwarsprofiel van rechte vaarwegvakken van de klassen
I t/m IV
Deelrapport III, mei 1982.
- [63] Werkgroep Vaarwegvakken
Literatuurstudie betreffende het dwarsprofiel van rechte
vaarwegvakken van de klassen I t/m IV
Deelrapport II, maart 1980
- [64] Werkgroep Vaarwegvakken
Verslag inventarisatie van bestaande Nederlandse vaarwegen van de
klassen I t/m IV
Deelrapport I, maart 1980.
- [65] Werkgroep Vaarwegvakken
Dimensionering van bochten en nevenaspecten
Deelrapport IV, augustus 1982.
- [66] Schäle, E.
Manövrierversuche auf gerader und gekrümmter Strecke des neuen Main-
Donau-kanals, ausgeführt mit dem Schiffstyp "Johan Welker" und
mehreren Schubverbänden in dem Haltungen Bamberg und Strullendorf
Schiff und Hafen, Heft 6, 1968.
- [67] Schäle, E.
Begegnen und Überholen von Schubverbänden im neuen Main-Donau-kanal
sowie Berg- und Talfahrter auf dem Main
Zeitschrift für Binnenschifffahrt Nr. 5, 1969.
- [68] Kühn, R.
Ergebnisse der Bamberger Kanal - und Schifffahrtsversuche und
Folgerungen für die Verbreiterung von Kurven und für die Ausbildung
der Deckwerke des Main-Donau-kanals
Schiff und Hafen, Heft 8, 1968.
- [69] Schäle, E.
Naturgrosse, experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung der
notwendigen Fahrwasserbreite in krümmungen strömender Gewässer
Schiff und Hafen, Heft 8, 1974.
- [70] Made, J.W. van der
Nota betreffende de bestuurbaarheidseigenschappen van schepen,
varende op kanalen
Rijkswaterstaat, Arrondissement Het Noordzeekanaal, rapport nr.
SD.57.04, augustus 1955.
- [71] Ministère de l'équipement et secrétariat d'état aux transports
Relative aux caractéristiques des voies navigables
Circulaire no. 76-38 du 1er Mars 1976.

- [72] Ismael e.a.
Inland navigation channels: review of principals of design
Civil Engineering Department, Engineering College, Basra
- [73] Press, H.
Wasserstrassen und Häfen
Berlin 1956
- [74] Waterloopkundig Laboratorium Delft
Padbreedte van schepen in rivierbochten
Verslag van modelonderzoek M 1240, Delen I, II, III en IV,
1975 - 1979.
- [75] Rijkswaterstaat, Dienst Verkeerskunde, Hoofdafdeling Scheepvaart
Padbreedte van duwstellen in rivierbochten
Nota S.73.3, 1973.
- [76] Ruiter, W. de
Studies concerning the behaviour of push-tow units
IAHR-symposium on aspects of navigability, Delft 1978.
- [77] Linde, A.A. van der
Onderzoek naar de mogelijkheden van 2-baks duwvaart op de Gelders
IJssel / de bocht bij Gorssel
Afstudeerverslag TH Delft, juni 1985.
- [78] Jansen, P.Ph. e.a.
Principals of River Engineering
Pitman, London, pp 509, 1979.
- [79] Verkerk, H.
Literatuurstudie naar het ontwerpen van binnenhavens
Afstudeerverslag vakgroep Waterbouwkunde, TH Delft, november 1983.
- [80] Verkerk, H.
Binnenhavens
Concept kollegediktaat TH-Delft, april 1984.
- [81] Ruiter, W. de
Binnenscheepvaart in beweging
Kluwer, 1980.
- [82] Commissie Vaarwegbeheerders
Richtlijnen voor de afmetingen en vormgeving van vaste en beweegbare
bruggen over vaarwater van de CEMT-klassen I t/m IV, maart 1985.
- [83] Heuser, H.H. und Fachausschus Binnenschiffe des VBW
Aktive Bugsteuerorgane für Binnenschiffe
Zeitschrift für Binnenschiffahrt und Wasserstrassen Nr. 8,
pp 219-234, 1985.
- [84] Drost, J.C.
Bepaling rendementscoëfficiënt van het voortstuwingsvermogen van
conventionele binnenschepen
Afstudeerverslag vakgroep Waterbouwkunde, TH Delft, mei 1986.

VOORNAAMSTE SYMBOLEN

symbool	eenheid	omschrijving
A_C	m^2	oppervlak van het ongestoorde kanaalprofiel
A'_C	m^2	oppervlak van het gestoorde kanaalprofiel (doorstromingsprofiel t.p.v. grootspant schip)
A_R	m^2	roeroppervlak
A_S	m^2	oppervlak van het ondergedompelde deel van het grootspant van het schip = b.d
A_{S1}	m^2	oppervlak van het ondergedompelde deel van het grootspant van het opgelopen schip
A_{S2}	m^2	oppervlak van het ondergedompelde deel van het grootspant van het oplopende schip
A_{sb}	m^2	door zijwind getroffen oppervlak van het schip (d.w.z. boven de waterlijn)
A_{so}	m^2	oppervlak van het ondergedompelde gedeelte van de scheepsromp = $0,9 \cdot l \cdot (b + 2 \cdot d)$
\bar{B}	m	gemiddelde kanaalbreedte = A_C/h_0
B_b	m	bodembreedte van het kanaal
B_d	m	kanaalbreedte op kielvlakhoogte
B_0	m	waterspiegelbreedte van het ongestoorde kanaal
B_z	m	kanaalbreedte op hoogte z
b	m	maximum scheepsbreedte (t.p.v. grootspant)
C	$m^{1/2}/s$	waarde van Chézy
C_D	-	weerstandscoëfficiënt voor de stromingsdruk
C_F	-	wrijvingscoëfficiënt
C_p	-	drukweerstandscoëfficiënt
C_w	-	golfweerstandscoëfficiënt
c	m/s	voortplantingssnelheid van een individuele golf
c_i	m/s	voortplantingssnelheid van een interferentiepiek
c_r	-	roeroppervlakte-faktor
c_t	m/s	voortplantingssnelheid van een transversale golf
c_{gr}	m/s	groepssnelheid van golven

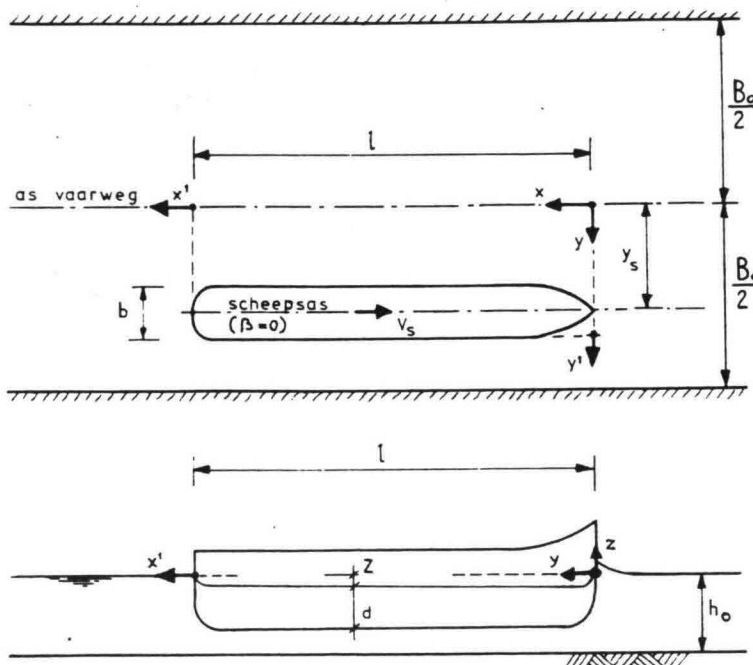
symbool	eenheid	omschrijving
D_e	m	effektieve schroefdiameter
D_p	m	schroefdiameter
D_{50}	m	gemiddelde korreldiameter (50 gewichts% door zeef)
d	m	diepgang stilliggend schip
d_m	m	maatgevende diepgang stilliggend schip
$d_{50\%}$	m	diepgang die door 50% van de schepen in een bepaalde klasse wordt overschreden
F	N	kracht
F_{ds}	N	benodigde dwarskracht door boegschroef bij stilliggend schip
Fr	-	Froude-getal = V/\sqrt{gh}
F_s	N	schroefkracht
g	m/s ²	versnelling van de zwaartekracht
G	-	gewichtszwaartepunt
H	m	golfhoogte
H_i	m	golfhoogte interferentiepiek
H_o	m	oorspronkelijke golfhoogte
H_t	m	golfhoogte transversale golf
H'_t	m	golfhoogte transversale golf achter schip nabij de oever
h	m	waterdiepte
\bar{h}	m	gemiddelde waterdiepte van het ongestoorde kanaal = A_c/B_o
h_o	m	waterdiepte van het ongestoorde kanaal
i	-	verhang
k	-	blokkagefactor = A_c/A_s
k'	-	scheepsvormfactor
k_m	-	manoeuvrerbaarheidscoëfficiënt
k_T	-	stuwkrachtcoëfficiënt

symbool	eenheid	omschrijving
k_w	-	zijwindcoëfficiënt
L	m	golflengte (ook: door golf afgelegde afstand, of: lengte kanaalpand)
L_d	m	golflengte divergerende golven
L_i	m	golflengte interferentiepieken
L_t	m	golflengte transversale golven
l	m	lengte van het schip
l_1	m	lengte van het opgelopen schip
l_2	m	lengte van het oplopende schip
l_{11}	m	scheepslengte tussen de loodlijnen
l_{w1}	m	scheepslengte op de waterlijn
l_{oa}	m	scheepslengte over alles
m	-	taludhelling (1:m) (ook: massa in kg/m^3)
m_s	kg	massa van het schip
n_p	omw/s	schroeftoerental (ook wel in omw/min = $1/60$ omw/s)
P_s	W	motorvermogen op de as (ook wel in pk = 735,4 W)
p	N/m^2	waterdruk
p_z	N/m^2	waterdruk op hoogte z
Q	m^3/s	debiet
R	m	boogstraal (ook: hydraulische straal kanaalprofiel)
Re_*	-	Reynoldsgetal = $\{V_s + U\} \cdot x / \nu$
R_F	N	wrijvingsweerstand
R_p	N	drukweerstand
R_T	N	totale weerstand
R_v	N	viskeuze weerstand
R_w	N	golfmakende weerstand
S	m^3/s	sedimenttransportcapaciteit
t	s	tijd

symbool	eenheid	omschrijving
t_i	s	tijd benodigd voor een inhaalmanoeuvre
T_d	-	taktisch draaipunt
U	m/s	maximale retourstroomsnelheid t.o.v. de oever
U'	m/s	relatieve maximale retourstroomsnelheid (t.o.v. waterbeweging in ongestoord kanaal)
U_1	m/s	retourstroom veroorzaakt door opgelopen schip
U_2	m/s	retourstroom veroorzaakt door oplopend schip
U_3	m/s	retourstroom veroorzaakt door opgelopen en oplopend schip
U_A	m/s	intreesnelheid van water in schroefschijf
U_E	m/s	resulterende stroomsnelheid achter schroef ten opzichte van de vaarweg
U_e	m/s	uitstroomsnelheid achter de schroef
U_o	m/s	stroomsnelheid in het ongestoorde kanaal
U_w	m/s	golfstroom
$U_{x,r}$	m/s	stroomsnelheid t.g.v. schroefstraal
V	m/s	snelheid
V_{gr}	m/s	grenssnelheid
V_{gr1}	m/s	grenssnelheid van het opgelopen schip
V_{gr2}	m/s	grenssnelheid van het oplopende schip
V_p	m/s	snelheid drukpunt
V_s	m/s	vaarsnelheid van het schip t.o.v. de oever
V'_s	m/s	relatieve vaarsnelheid van het schip (t.o.v. waterbeweging in ongestoord kanaal)
V_{s1}	m/s	vaarsnelheid van het opgelopen schip
V_{s2}	m/s	vaarsnelheid van het oplopende schip
V_w	m/s	golfstroom
W	m/s	windsnelheid
W_{\perp}	m/s	komponent van de windsnelheid loodrecht op de kanaal- oever
W'	-	reduktieparameter i.v.m. wervel- en zoggebied

symbool	eenheid	omschrijving
X'	m	konstante afstand achter het schip = $f(D_e)$
x	m	afstand vanaf de boeg (in richting achterschip)
$x' (X_s)$	m	afstand achter het schip = $x - l$ (ook: loopweg van een waterdeeltje)
y	m	afstand vanuit de as van de vaarweg
y'	m	afstand vanuit de zijkant van het schip
y_s	m	afstand van zwaartepunt schip tot as vaarweg
Z	m	maximale spiegeldaling (ook: hoogte translatiegolf)
Z_1	m	spiegeldaling veroorzaakt door opgelopen schip
Z_2	m	spiegeldaling veroorzaakt door oplopend schip
Z_3	m	spiegeldaling veroorzaakt door opgelopen en oplopend schip
z	m	vertikale afstand t.o.v. ongestoorde waterspiegel (omhoog is positief)
α	-	korrektiecoëfficiënt Schijf (ook: hoek of: evenredigheidsfaktor voor windverhang)
α'	-	coëfficiënt voor bepaling padbreedte in bochten
α_i	-	coëfficiënt t.b.v. golfhoogte interferentiepiek
α_t	-	coëfficiënt t.b.v. golfhoogte transversale golven
β	°	drifthoek (ook: grootspantcoëfficiënt)
β_w	°	extra drifthoek t.g.v. zijwindhinder
γ	-	boegvormcoëfficiënt (ook: hoek)
γ_t	-	coëfficiënt t.b.v. golfhoogte transversale golf
Δ	-	relatieve dichtheid = $(\rho_s - \rho_w)/\rho_w$
δ	-	blokcoëfficiënt
δ^*	m	verdringingsdikte langs de scheepshuid
δ_r	°	roerhoek
δ_r'	°	som van twee uiterste aan elkaar tegengestelde achtereenvolgende roeruitslagen
η	m	waterspiegelniveau boven ongestoorde waterspiegel

symbool	eenheid	omschrijving
η_o	-	schroefcoëfficiënt
η_R	-	rendement tussen vrijvarende schroef en werkelijke schroefplaatsing
η_s	-	rendement tussen motoras en schroef
η_T	-	rendement voortstuwcr bij energiemethode
η'_T	-	rendement voortstuwcr bij impuls methode
λ	-	beladingsgraad
λ_m	-	maatgevende beladingsgraad
ν	m^2/s	kinematische viscositeit
ρ	kg/m^3	soortelijk gewicht
ρ_s	kg/m^3	soortelijk gewicht sediment
ρ_w	kg/m^3	soortelijk gewicht water
ϕ	-	hoek (bv. windrichting met kanaalas)
ψ	-	(translatie)golfhoogte-reductiecoëfficiënt
ω	rad/s	koershoeksnclheid



TEKENAFSPRAAK voor $\beta = 0$, dat wil zeggen geen drifhoek

Bijlage 1 MARKTSTRUKTUUR EN REGELINGEN IN DE BINNENVAART

B1.1. Marktstructuur

De binnenvaart houdt zich voornamelijk bezig met het vervoer van laagwaardige, niet bederfelijke massagoederen zoals veevoeders, ertsen, zand en grind, aardolie etc.

In deze bijlage zal voornamelijk gesproken worden over het **beroepsvervoer van droge lading**. Deze sector kan worden gezien als één samenhangende markt. Weliswaar bestaat die markt administratief gezien uit een aantal verschillende delen (namelijk de wilde vaart, het bijzonder vervoer, de campagnevaart en de beurtvaart), maar het zijn in principe dezelfde soort schepen en dezelfde soort vervoerders die op de verschillende deelmarkten actief zijn. Ook is er een duidelijke overloop met het internationale vervoer van droge lading: de Rijnvaart en het Noord-Zuidverkeer.

NB: In de ekonomie wordt vervoer niet als produktie beschouwd maar als een dienst, en heeft met de overige diensten gemeen dat niet op voorraad geproduceerd kan worden. Een afname van de vraag wordt daarom rechtstreeks gevoeld in onderbezetting van de capaciteit. Verder is de vraag naar vervoer een afgeleide van de geografische spreiding tussen aanbod en vraag naar goederen, en kan in principe niet door de vervoerssector worden beïnvloed.

Vraag en aanbod op de binnenvaartmarkt zijn op zeer verschillende wijze gekonstrueerd.

Aan de ene kant staat een groot aantal aanbieders van scheepsruimte, meest kleine ondernemingen, die onderling nauwelijks samenwerken en alle een vrijwel gelijk produkt aanbieden, namelijk scheepsruimte. In Nederland wordt ongeveer driekwart van het binnenlands en grensoverschrijdend beroepsvervoer van droge lading verzorgd door partikuliere schipper. De vraagzijde van de markt bestaat uit een beperkt aantal meest grote ondernemingen, die vaak onderling samenwerken in hun benadering van de markt. De kartels van zand- en grindhandelaren en producenten zijn in dit verband bekende voorbeelden. Bovendien kunnen de verladers en ladingontvangers altijd nog kiezen voor eigen vervoer of railvervoer. Een dergelijke marktsituatie leidt onvermijdelijk tot een scherpe concurrentie tussen de aanbieders.

Hier komt nog bij dat een dalende vrachtprijs voor een aantal schippers een prikkel is om een extra inspanning te leveren, om het bruto jaarinkomen nog enigszins op peil te houden. Dit wordt mede veroorzaakt door het grote aandeel van de vaste kosten in de totale kosten. (Rederijen reageren overigens juist omgekeerd; overwerkvergoedingen e.d. zullen worden ingetrokken en er wordt meestal kalmer gevaren.) Het spreekt vanzelf dat deze reaktie funest is voor de prijsvorming op de vrachtenmarkt. Door vergroting van de produktiviteit wordt de overcapaciteit immers versterkt en dalen de vrachtprijzen nog verder.

Omdat een (kleine) binnenvaartondernemer jarenlang kan blijven vervoeren zonder kostendekkende exploitatie (door uitstellen onderhoud e.d.) zal de markt zich ook niet snel automatisch herstellen door faillissementen. De gemiddelde schipper heeft overigens geen keus: hij heeft geen huis aan de wal en geen andere diploma's dan die betrekking hebben op zijn beroep, dus hij kan moeilijk stoppen. Bovendien is in een slechte conjunctuur de handelswaarde van zijn schip vaak (te) laag, zodat de banken er de voorkeur aan geven om zelfs de niet-betaalde rente bij de schuld te tellen en maar te wachten op betere tijden.

In principe worden twee markten onderscheiden:

- De **vrije markt** (ca. 70% van het vervoerd gewicht). Deze bestaat voornamelijk uit de internationale vaart. Met name de Rijnvaart (het grootste en snelst groeiende deel van de binnenscheepvaart) is met de middels de Akte van Mannheim geregelde vrijheid van scheepvaart een typisch voorbeeld van een markt met vrije prijsvorming.
- De **gereguleerde markt** (ca. 30% van het vervoerd gewicht), met toerbeurt-systemen. Onderscheiden kunnen worden het binnenlandse vervoer via de Evenredige Vrachtverdeling (EV) en het vervoer naar België via de Vereniging Toerbeurt Noord-Zuid.

Markt	vervoerd gewicht	
	(x 1000 ton)	(%)
BINNENLANDSE VAART		
droge lading: wilde vaart	24.642	15,2
bijzonder ongeregeld vervoer	6.355	3,9
beurtvaart	583	0,4
campagnevaart	1.243	0,8
eigen vervoer	28.875	17,8
tankvaart: beroepsvervoer	2.730	1,7
eigen vervoer	6.776	4,2
Totaal binnenlandse vaart	71.204	43,9
INTERNATIONALE VAART		
Rijnvaart: droge lading	49.981	30,8
tankvaart	9.045	5,6
Noord-Zuid	29.216	18,0
Overige internationale vaart	2.726	1,7
Totaal internationale vaart	90.974	56,1
TOTAAL	162.172	100,0

Tabel 1. Vervoerd gewicht in de binnenlandse en internationale vaart in 1983 door schepen onder Nederlandse vlag.

Een groot deel van de Nederlandse particuliere schippers neemt deel aan de internationale vaart, maar maakt af en toe ook gebruik van de binnenlandse EV. Beide markten werken als kommunicerende vaten: een daling van de vrije vrachten veroorzaakt een vlucht naar de gereguleerde markt met vaste vrachten, waardoor de wachttijden toenemen en ook daar de inkomens dalen. Dankzij de gereguleerde markt wordt de inkomensdaling echter afgeremd c.q. beperkt. In de eerste plaats omdat, althans op dit deel van de markt, de vrachtprijzen op peil gehouden worden. En in de tweede plaats door het feit dat (bijvoorbeeld bij hoge waterstanden op de Rijn, dus minder vraag naar laadruimte) de vrije markt enigszins ontlast wordt als een aantal schippers besluit zich terug te trekken van die markt door zich in te laten schrijven op de toerbeurtlijsten.

De toerbeurtsystemen maken het mogelijk om in de particuliere vaart **reservecapaciteit** in stand te houden zonder dat dit direkt vrachtprijsbedervend werkt. Schepen die op de beurtlijst staan ingeschreven doen immers niet aan prijsonderbieding, in tegenstelling tot de vrije markt waar men door prijskonkurrentie aan lading moet zien te komen.

Om de reservecapaciteit in de binnenvaart goed te kunnen opvangen moet de omvang van de gereguleerde markt niet te klein zijn ten opzichte van de

vrije markt. Op het moment is deze te klein om deze functie voor de gehele markt goed te kunnen vervullen, zodat sprake is van een overcapaciteit. In 1984 kende de Nederlandse binnenvloot voor het vervoer van droge lading een overcapaciteit van ca. 30% van het totale laadvermogen. Rekening houdend met de benodigde reservecapaciteit (voortkomend uit het feit dat vervoerdiensten niet op voorraad geproduceerd kunnen worden), houdt men altijd nog een aanzienlijke **strukturele overcapaciteit** over (schatting: 0,5 mln ton).

De prijskonkurrentie op de zogenaamde vrije markten dankt zijn hevigheid in hoofdzaak aan de strukturele overcapaciteit op de binnenvaartmarkt. Anders dan in andere bedrijfstakken komt een min of meer vloeiende aanpassing van het aanbod aan de vraag in de transportsector niet tot stand. Op een verkleining van de vraag wordt ook op lange termijn niet gereageerd, maar op een vergroting daarvan reageert men vrijwel onmiddellijk. Niet alleen door het beschikbare materiëel intensiever in te zetten, maar ook door het aan de vloot toevoegen van nieuwe schepen.

Overcapaciteit is overigens niet alleen een probleem van de Nederlandse binnenvloot, maar ook van de vloten van de overige Rijnsoeverstaten. Grote verschillen in inzicht inzake de bestrijding van het probleem van de overcapaciteit maken de oplossing ervan buitengewoon moeilijk.

B1.2. Toerbeurtsystemen

In Nederland, België en Frankrijk zijn voor het **binnenlands vervoer** toerbeurtsystemen van kracht. In Nederland staat het systeem bekend als **Evenredige Vrachtverdeling**, in België is het de Dienst voor de Regulering van de Binnenvaart en in Frankrijk spreekt men van de Tour de rôle. De systemen werken alle drie in grote lijnen op dezelfde manier:

Het land is verdeeld in rayons, per rayon is er een schippersbeurs. Verladende bedrijven binnen het rayon moeten hun aanvragen om scheepsruimte (voor binnenlands vervoer) deponeren bij de beurs. Op de beurs staan de schepen ingeschreven die binnen het rayon laadgereed zijn en beschikken over een exploitatievergunning voor binnenlands vervoer. De aangeboden vrachten worden op toerbeurt verdeeld onder de ingeschreven vervoerders, dat wil zeggen wie het langst ingeschreven staat heeft de eerste keus uit het aangeboden. Er gelden standaardprijzen die zijn vastgesteld door de overheid en er worden standaardvervoersvoorwaarden gehanteerd. Een rijksdienst (in Nederland de Rijksverkeersinspektie) is belast met de korrekte uitvoering van de regeling, waaronder de controle op de naleving van de vrachtprijzen. De kosten van de betreffende dienst worden verhaald op de vervoerders door middel van een inhouding op de vrachtsom (in Nederland 2%).

Naast deze binnenlandse toerbeurtsystemen bestaat er ook nog het vrijwillige toerbeurtsysteem voor het Noord-Zuidverkeer. Eén en ander wordt hier niet geregeld door rijksambtenaren, maar door mensen in dienst van de Vereniging Toerbeurt Noord-Zuid.

B1.2.1. Evenredige Vrachtverdeling

De hoofddoelstelling van de EV is de beschikbare lading zo goed mogelijk te verdelen over de ondernemers in de binnenvaart, waarbij een redelijk vrachtprijsniveau moet worden gehandhaafd. Voordelen van de EV zijn dat bij weinig lading de lasten daarvan evenredig over de schippers worden verdeeld, en dat men elkaar niet kan gaan onderbieden. Voor de verlader

bestaat echter het nadeel dat hij niet meer vrij is in de keuze van de schipper die het beste en het goedkoopste kan vervoeren.

De EV geldt alleen voor het ongeregeld binnenlands beroepsvervoer van droge lading, de zogenaamde **wilde vaart**. Voor het verkrijgen van een wilde vaartvergunning, een voorwaarde om in te mogen schrijven op de beurs, moet een schip aan strenge eisen voldoen. 80 à 90% van de Nederlandse vrachtschepen in het beroepsvervoer beschikt over zo'n vergunning. Het grensoverschrijdend vervoer valt niet onder de regeling. Dit omdat een aantal internationale verdragen (zoals de Akte van Mannheim) de vrije handelsvaart garanderen op de Rijn, zijn zijrivieren en uitmondingen en op alle verbindingswegen naar de open zee en naar België.

De EV dateert al uit de 30-er jaren. Nederland verkeerde toen in de krisistijd en voor de partikuliere binnenschippers was de situatie praktisch onhoudbaar geworden. De regering vond overheidsingrijpen noodzakelijk en zo kwam in mei 1933 een wet die voorzag in "tijdelijke maatregelen ter bevordering van een zooveel mogelijk evenredige vrachtverdeling in de binnenscheepvaart". Als een belangrijk voordeel werd gezien dat de invoering van deze EV de overheid geen geld zou kosten. Oorspronkelijk was het de bedoeling dat de regeling in 1938 zou aflopen, maar mede door de naderende oorlog kwam het daar niet van. Ook na de oorlog bleek er voorlopig behoefte aan een vrachtverdelingsregeling en daarom werd deze meegenomen in de Wet Goederenvervoer Binnenscheepvaart, die in 1954 van kracht werd. Uiteindelijk kwam de regering in 1969 met een wetsontwerp ter opheffing van de EV, dat echter pas in 1975 in de Kamer zou komen. Het belang van de EV voor de binnenschipper werd in dit wetsontwerp onderschat: het aandeel van het via de EV geregelde vervoer in het binnenlands beroepsvervoer van droge lading bedraagt ca. 35% van het vervoerde gewicht, dat wil zeggen 47% van de vervoersprestatie (tonkm) of 60% van de totale vrachtsom. De plannen tot afschaffing van de EV leidden dan ook tot massaal verzet, waarop de Kamer besloot de EV in stand te houden.

B1.2.2. Vrijwillige toerbeurt Noord-Zuidverkeer

Als gevolg van internationale overeenkomsten was er een volledig vrije markt voor het grensoverschrijdend vervoer van Nederland naar België of via dit land naar Frankrijk. Dit leidde tijdens de laagconjunctuur, die in 1975 een dieptepunt bereikte, tot zeer lage vrachtprijzen; de ene schipper werd tegen de andere uitgespeeld. Ten tijde van de akties in 1975 kwamen daarom vooral de partikuliere spitsenschippers tot het initiatief om een op vrijwillige basis gestoelde vorm van evenredige vrachtverdeling voor het Noord-Zuidverkeer van de grond te brengen. De in september 1975 opgerichte Initiatiefgroep Toerbeurt Noord-Zuidverkeer (later om rechtspersoonlijkheid te verkrijgen omgezet in een statutaire Vereniging) stelde tarieflijsten op met bodemtarieven. Beneden deze tarieven zou door partikulieren geen vervoer meer verricht worden. De verdeling van de reizen geschiedt (evenals bij de EV) op toerbeurt. Het benodigde personeel hiervoor is in dienst van de vereniging; de kosten hiervan worden betaald uit een inhouding van 1% op de vrachtsom. De naleving van dit systeem is gebaseerd op solidariteit, en bij gebrek hieraan helaas ook wel op intimidatie.

Ruwweg 2/3 deel van de door partikulieren vervoerde droge lading, exclusief zand en grind, wordt bevracht via dit toerbeurtsysteem. Het zand en grind wordt in het Noord-Zuidverkeer, evenals in het binnenlands vervoer, voornamelijk bevracht via relatievaart. Ongeveer 2/3 deel van het vervoer via de toerbeurt wordt verricht door Nederlandse schepen; de meeste van

die schepen komen terug met een lading die is verworven op de Belgische en Franse beurslijsten.

B1.2.3. Uitbreiding van de toerbeurtsystemen

Een probleem van de partikuliere binnenschippers is dat zij met elkaar in hoofdzaak zorgen voor de noodzakelijke reservecapaciteit, terwijl diezelfde reservecapaciteit in perioden met minder vraag naar scheepsruimte als een molensteen om hun nek hangt. De bedrijfsvoering van de rederijen en de eigen vervoerders is er namelijk op gericht om het beschikbare materieel zoveel mogelijk continu bezet te houden. Bij een tijdelijke extra behoefte aan scheepsruimte is het gebruikelijk dat rederijen van partikulieren scheepsruimte huren.

Het aandeel van de gereguleerde markt van de Nederlandse partikulieren ten opzichte van de vrije markt is thans echter nog te klein om de reservecapaciteit soepel op te kunnen vangen. Wanneer de gereguleerde markt zou uitbreiden kan worden verwacht dat deze beter in staat zou zijn tijdelijke overcapaciteit in zich op te nemen, waardoor de partikulieren op de vrije markt minder snel voor afbraakprijzen zouden gaan varen.

Veel organisaties van partikuliere schippers pleiten dan ook onder andere voor:

- a. Het onderbrengen van het binnenlands vervoer van zand en grind in de EV.
- b. Het afschaffen van eigen vervoer met huurschepen. Dit vervoer zou dan via de EV bevracht kunnen worden, of over moeten gaan op echt eigen vervoer.
- c. Vergroten van het aandeel van de toerbeurtbevrachting in het Noord-Zuidverkeer. Dit zou in de eerste plaats betekenen dat het zand- en grindvervoer tussen Nederland en België onder de gereguleerde markt gebracht zou moeten worden, en dat de toerbeurtregeling een wettelijk kader zou moeten krijgen.

ad a. Ca. 50% van het totale binnenlandse beroepsvervoer van droge lading komt nu op rekening van de zand- en grindvaart. Dit is in eerste instantie buiten de EV gehouden omdat gemeend werd dat deze sector ook zonder overheidsingrijpen gezond zou blijven. Nadat echter in 1966 de Commissie Vervoersvergunningen besloot om de uitbreiding van de wilde vaart vloot met oud materieel een halt toe te roepen, kwamen vele oude schepen (voornamelijk gebruikte schepen die vanuit het buitenland werden ingevoerd) niet meer in aanmerking voor een wilde vaartvergunning. Wel konden zij nog gemakkelijk een vergunning krijgen voor "bijzonder ongeregeld vervoer". Door prijsonderbieding wisten deze schepen zich een plaats te verwerven in de zand- en grindvaart, hetgeen leidde tot prijsafbraak. Tegen de wens van vele partikulieren om het zand- en grindvervoer onder te brengen in de EV, brachten de verladers in dat de EV onvoldoende garantie biedt voor continuïteit en bedrijfszekerheid, dat het schoon uitlossen van schepen die afwisselend verschillende ladingsoorten vervoeren problemen zou geven, en dat een vrachtprijsverhoging de concurrentiepositie ten opzichte van buitenlandse producenten te zeer zou verslechteren. Uiteindelijk is men tot een regeling gekomen die als uitgangspunt heeft dat er wettelijke minimumtarieven dienen te gelden, die effectief gecontroleerd moeten worden. Gekozen is voor het principe van de vrachtverdeling, dat wil zeggen een vervoersovereenkomst tussen verladers en vervoerders mag slechts gesloten worden met tussenkomst van de Rijksverkeersinspektie. Deze ziet toe op de naleving van het tarief en de vervoersvoorwaarden, en verdeelt de lading volgens bepaalde regels onder de gegadigde vervoerders. Om de verladers in hun bezwaren tegemoet te komen is onder

andere de mogelijkheid van periodebevrachting (bijvoorbeeld voor drie maanden) in de regeling opgenomen.

ad b. Het gaat hier om beroepsvervoerders die met hun schip voor een bepaalde periode door een verladend bedrijf worden ingehuurd. Na afloop van het huurcontract komt zo'n vervoerder weer terug op de markt van de beroepsvervoerders. Volgens de schippersorganisaties moet het systeem met huurschepen worden afgeschaft omdat dit een verkapte vorm van beroepsvervoer is die concurrentievervalsend werkt. In 1977 leidde dit tot een selectieve boycot op de schippersbeurzen, waarbij geen lading meer werd geaccepteerd van verladers die een deel van hun vervoer lieten verrichten door huurschepen. Het resultaat was een voorlopige bevrizing van het aantal inschrijvingen voor eigen vervoer met huurschepen. Bovendien ligt er een voorstel tot wijziging van de Wet Goederenvervoer Binnenscheepvaart. Dit voorstel bepleit niet de afschaffing van het eigen vervoer met huurschepen, maar beoogt dit zoveel mogelijk gelijk te stellen aan het gewone eigen vervoer om oneerlijke concurrentie van het EV-gebonden beroepsvervoer te voorkomen. Zo wordt de minimale duur van de huurovereenkomst gebracht van één op vijf jaar, en moet de bemanning van het huurschip in loondienst staan bij de eigen vervoerder, en kan dus aanspraak maken op de in die bedrijfstak geldende lonen en werktijden. Verder bepleit men het instellen van minimum huurprijzen die ruwweg overeen zouden moeten komen met het vrachtprijzensysteem op de beurs. Om een einde te maken aan de vaak te afhankelijke positie van schippers die in het bezit zijn van een schip zonder wilde vaartvergunning (vergelelijk zand- en grindvervoer), zou men bovendien deze in aanmerking moeten laten komen van zo'n wilde vaartvergunning.

ad c. Naar de mening van de schippers waren er twee grote problemen met het bestaande toerbeurtsysteem Noord-Zuid: enerzijds werd een te groot deel van de lading aan het systeem onttrokken, en anderzijds bestond de basis onder het systeem slechts uit gevoelens van solidariteit bij de meerderheid en angst voor molestatie bij een niet solidaire minderheid. Deze basis achtte men in de eerste plaats onjuist en in de tweede plaats te zwak. Toen bleek dat in geen van deze problemen werd tegemoet gekomen (door tegenwerking van verladers en op grond van internationaal juridische overwegingen) brak er in januari 1979 een staking uit; de partikulieren staakten niet alleen in het Noord-Zuidvervoer maar ook in de binnenlandse wilde vaart. Het resultaat was een akkoord tussen overheid, schippers, reders en verladers met als voornaamste punten de toezegging van een wettelijke affichageverplichting (verplichte aankondiging van vrachten op de beurs) en van een nieuwe structuur voor het functioneren van het vrijwillige toerbeurtsysteem. Nog steeds hebben de verschillende belangengroepen geen volledige overeenstemming bereikt.

B1.3. Rijnvaart

Nadat in 1815 Napoleon zijn Waterloo gevonden had, werd er in het Congres van Wenen beslist over het nieuwe aanzien van Europa. Hierbij was ook de Rijn een belangrijk discussiepunt. Deze rivier heeft nooit voldaan als scheidslijn tussen Franse en Duits/Oostenrijkse vechtersbazen, maar was wel een vervoersweg van economisch levensbelang.

Eén jaar later werd als een direkt uitvloeisel van dit congres de **Centrale Commissie voor de Rijnvaart** (1816) opgericht, die toezicht op het Rijnvaartregime (vrije vaart, redelijke behandeling en vrijdom van heffingen) zou houden.

Dit leidde in 1831 tot de Rijscheepvaartakte van Mainz, die in 1868 werd vervangen door de Herziene Rijnvaartakte, beter bekend als de **Akte van**

Mannheim. Nadien zijn er nog belangrijke veranderingen en aanvullingen aangebracht, hetgeen alleen mogelijk is als de lidstaten het unaniem eens zijn. Deze lidstaten zijn: de Rijnsoeverstaten (West-Duitsland, Frankrijk, Zwitserland en Nederland), België en (sinds 1919) Groot Brittannië.

NB: Een recent voorbeeld van zo'n aanvulling is het zg. Tweede Additional Protocol bij de Akte van Mannheim, dat bepaalt dat schepen uit de staats-handellanden die via het (volgens de planning in 1992 open te stellen) Rijn-Main-Donaukanaal op de Rijn zouden terechtkomen, en niet voldoen aan de CCR-voorwaarden, niet meer kunnen deelnemen aan het Rijnverkeer. Elk Westeuropees schip dat op de Rijn vaart moet uiterlijk 1 februari 1987 een verklaring aan boord hebben waaruit blijkt dat het werkelijk een westers schip is. Met deze verklaring aan boord kan de schipper aantonen dat hij op grond van de Akte van Mannheim vervoer mag verrichten op de Rijn en haar zijrivieren. Schepen uit andere landen krijgen zo'n verklaring niet; zij hebben voor dat vervoer eerst toestemming nodig van de CCR. Deze aanvulling moet dienen om te voorkomen dat de zwaar gesubsidiëerde Oostblok-vloot met dumprijzen op de Rijn verschijnt (net als nu in de zeevaart het geval is).

De **belangrijkste bepalingen** van de Akte van Mannheim zijn:

- Vrijheid van schepen, bemanningen en ladingen van alle landen, voorzover de voorschriften van de Scheepvaartpolitie worden nageleefd.
- Gelijke behandeling van alle schippers ongeacht hun nationaliteit.
- Vrijstelling van tol, vereenvoudiging van de douaneformaliteiten met name voor doorgaand verkeer, en de inrichting van vrijhavens door de lidstaten.
- Verplichting voor alle lidstaten om te zorgen voor een goed onderhoud en verdere ontwikkeling van de waterwegen, het uit de weg ruimen van hindernissen voor de scheepvaart (en coördinatie van deze maatregelen door de CCR).
- Het uitwerken van voorschriften ten aanzien van de inrichting en uitrusting van schepen, ten aanzien van de Scheepvaartpolitie en de veiligheid van het scheepvaartverkeer. De Rijnvaart is vrij streng gereguleerd omdat er nogal wat gevaarlijke stoffen worden vervoerd.
- Een permanent toezicht door de CCR op de naleving van de Akte van Mannheim en de mogelijkheid bij deze commissie klachten te deponeren.

Dit betekent dat op de Rijn en haar zijrivieren nu al bijna 120 jaar een regime van vrije prijsvorming heerst, hetgeen een belangrijke bijdrage heeft geleverd aan de bloei van havens aan die waterweg en aan de industrie in de omringende landen. De vrijheid van scheepvaart is evenzo van grote betekenis geweest voor de binnenvaart zelf.

Ter indicatie: in 1980 werd op de Rijn en haar zijrivieren 282,7 mln ton goederen vervoerd (56,9 miljard tonkm) tegen bijvoorbeeld 90,3 mln ton (24,6 miljard tonkm) op de Donau. Overigens is er op de Donau sprake van een planekonomie in plaats van een markteconomie.

Door de sterke schommelingen in de waterstand is de Rijnvaart de sektor in de binnenvaart waar de vraag naar scheepsruimte het sterkst varieert. Bovendien wordt de Rijnvloot steeds "waterstandsgevoeliger" omdat door schaalvergroting en vlootvernieuwing steeds meer diepstekende schepen aan de vloot worden toegevoegd en oude vlakgaande schepen aan de vloot worden onttrokken. Dit betekent dat de behoefte aan reservecapaciteit in de Rijnvaart steeds groter wordt. Een groot bezwaar is dat de gereguleerde markten hiervoor moeten opdraaien. De binnenlandse bevrachters, die gedwongen zijn via de toerbeurssystemen te bevrachten, moeten dus indirect de reservecapaciteit voor de Rijnverladers financieren. Vele partikulieren

pleiten er daarom voor, om ook voor de internationale Rijnvaart één of andere regeling te ontwerpen, waarmee een zekere reservecapaciteit in stand gehouden kan worden zonder dat dit een sterke vrachtprijsbedervende werking heeft.

De meeste partijen die betrokken zijn bij het internationale Rijnvaart-overleg zijn echter uitgesproken tegenstanders van overheidsbemoeienis op het gebied van tarifiering en vrachtverdeling. Zij voeren onder andere aan dat Nederland weliswaar de grootste Rijnvloot heeft (ongeveer de helft van alle Westeuropese binnenschepen vaart onder Nederlandse vlag), maar bijna geen eigen lading. De opdrachtgevers zijn voornamelijk Duitsers, Fransen en Zwitsers.

Nationaliteit	aantal schepen	laadvermogen (ton)
Zwitserland	389	629.597
Frankrijk	709	411.823
Duitse Bondsrepubliek	3.212	3.290.738
Nederland	6.613	5.273.727
België	1.568	1.291.344
Overige landen	17	8.236
Totaal	12.508	10.905.465

Tabel 2. Aantal schepen en laadvermogen van de vloten van de Rijnoverstaten en België (1984).

B1.4. Regelingen

Gezien de sterke verwevenheid van de binnenlandse en de internationale markten kan het probleem van de overcapaciteit in de Westeuropese binnenvaart slechts worden opgelost door internationale (of internationaal ge-coördineerde) maatregelen.

Ten eerste moet het aanbod van scheepsruimte worden teruggebracht, en ten tweede moet de toegang tot de aanbodzijde van de markt aan strenge voorwaarden worden gebonden. Helaas verschilt men vooral ten aanzien van het tweede punt internationaal nogal van mening.

B1.4.1. Sloopregeling

In de Duitse Bondsrepubliek is sinds 1969 onafgebroken een sloopwet van kracht geweest. Op grond van deze sloopwet is meer dan één miljoen ton (al dan niet actief in de markt ingezette) scheepsruimte aan de vloot onder Duitse vlag onttrokken. Daarnaast heeft de export van gebruikte schepen met name naar Nederland plaatsgevonden. Dankzij relatief weinig investeringen in nieuwe schepen is de Westduitse binnenvloot in de achterliggende vijftien jaar aanzienlijk kleiner geworden.

Mede dankzij de genoemde import van Duitse binnenschepen kan dat niet gezegd worden van de Nederlandse binnenvloot. De drie sloopregelingen, die Nederland sinds 1968 heeft gekend, hebben er weliswaar toe geleid dat er één miljoen ton scheepsruimte aan de markt is onttrokken, maar deze tonnage is evenwel vervangen door modernere, zodat het prestatiepotentiël van de vloot per saldo is vergroot. Deze gang van zaken toont de noodzaak aan van maatregelen die moeten voorkomen dat nieuwe tonnage zonder meer op de markt komt of onder een andere vlag in de markt blijft.

In Nederland wordt daarom overwogen om een z.g. nieuw-voor-oud-regeling aan de uitvoering van de sloopwet te koppelen. Toevoeging aan de vloot van nieuwe schepen zou dan slechts mogelijk zijn als tenminste evenveel of zelfs meer tonnage aan de markt wordt onttrokken.

De vraag blijft echter in hoeverre de overige Rijnsoeverstaten bereid zijn om dergelijke maatregelen te nemen. Tot dusverre hebben zij zich krachtig verzet tegen elke regeling van de toegang tot de markt. Zo voelt de Duitse Bondsregering nog niets voor een regeling om het aan de vloot toevoegen van schepen te bemoeilijken.

Op 30 juni 1976 werd de **Wet Sloopregeling Binnenvaart** van kracht, houdende regelen ter bevordering van het slopen van binnenschepen. Deze wet was bedoeld voor motorschepen, sleep- of duwboten, sleepschepen en bakken, en mits voldaan werd aan aparte voorwaarden (zoals het betalen van een hogere heffing) ook voor tankschepen. Niet voor vissersschepen, veerponten e.d. Belangrijke punten:

- Overleggen van een verklaring waarin staat in hoeverre de slooputkering binnen drie jaar na ontvangst besteed zal worden voor een ander binnenschip.
- Controle op sloop.
- Hogere slooputkering bij bedrijfsbeëindiging, d.w.z. als het om het enige schip gaat.
- Uitkering afhankelijk van het type schip, laadvermogen, motorvermogen, ouderdom.

Inmiddels (februari 1986) heeft een nieuwe sloopregeling voor de binnenvaart alle vereiste goedkeuringen gekregen, en is daarmee in werking getreden. De regeling geldt zowel voor schippers die hun bedrijf willen beëindigen, als voor schippers die een deel van hun tonnage willen afstoten of tot aanschaf van een ander schip besluiten. Binnenschippers die willen deelnemen aan de sloopregeling kunnen hun schip in plaats van te laten slopen ook exporteren naar de Derde wereld of overdragen aan een Nederlandse stichting of vereniging die het schip uit de markt haalt.

De sloopregeling heeft tot doel de 500.000 ton structurele overcapaciteit aan scheepsruimte uit de binnenvaart te halen. De totale kosten bedragen 70 miljoen gulden, waarvan het Rijk 35 miljoen betaalt en het bedrijfsleven daarna (op z'n vroegst na 1 januari 1988) het restant op tafel moet leggen. De bijdrage (per ton scheepsruimte) zal maximaal 7 jaar gelden. Schippers die aantoonbaar weinig inkomen hebben kunnen van de heffing worden vrijgesteld.

B1. 4.2. **Stillegregeling**

Vele jaren is er gewerkt aan het ontwerpen van een Europese Stillegregeling. Het was de bedoeling een fonds te vormen van waaruit vervoerders bij teruglopend ladingaanbod betaald zouden kunnen worden, als zij hun schip (of schepen) tijdelijk wilden opleggen. Het fonds zou gevuld worden door een heffing per ton laadvermogen. In tegenstelling tot bij het toerbeurtstelsel is er nog steeds sprake van een markt met vrije prijsvorming. Bovendien wordt hier de wachttijd niet verdeeld over alle schepen, maar wordt een beperkt aantal volledig op non-actief gezet, terwijl de andere schepen met een zo hoog mogelijke snelheid kunnen doorvaren.

Voor de rederijen is dit systeem vrij gunstig. Konzerngebonden rederijen hebben immers veelal langlopende contracten (in tegenstelling tot de partikulier die vaak op de dagvrachtenmarkt opereert) en zijn daarom

nauwelijks gevoelig voor prijsdalingen ten gevolge van een tijdelijke overkapakiteit. Bovendien laten zij liever een deel van de vloot optimaal draaien terwijl een ander deel is opgelegd en de bemanning op wachtgeld staat of gedeeltelijk afvloeit. Dit is al gauw aantrekkelijker dan de hele vloot in bedrijf houden en de wachttijd uitsmeren over alle schepen.

Partikuliere schippers zien daarentegen grote nadelen. Zo vrezen zij een onvoldoende verbetering van de vrachtprijs, omdat de periode met een overschot aan laadruimte waarschijnlijk te lang duurt om een voldoende groot fonds te kunnen vormen (dus maar weinig schepen opgelegd kunnen worden). Ook vinden zij de verdeling van de lusten en lasten oneerlijk. Schepen die zich niet konstant in het gebied bevinden waarbinnen de regeling geldt (dit zijn voornamelijk de partikulieren) zouden per dag een 20% hogere heffing moeten betalen. Bovendien is de heffing per ton laadvermogen voor moterschepen bijvoorbeeld een faktor 3 hoger gesteld dan voor duwbakken. Tenslotte past de regeling niet bij de bedrijfsstructuur van de particulieren. Deze zien de wachttijden liever gelijkmatig over het jaar verdeeld, dan dat zij maanden achtereen stil moeten liggen en de rest van het jaar hard door moeten varen.

Evenals andere plannen - zoals prijsstabilisatie door samenwerking, pools, konventies - is de stillegregeling naar de achtergrond verdwenen door gebrek aan medewerking en twijfel aan de effectiviteit.

Bijlage 2

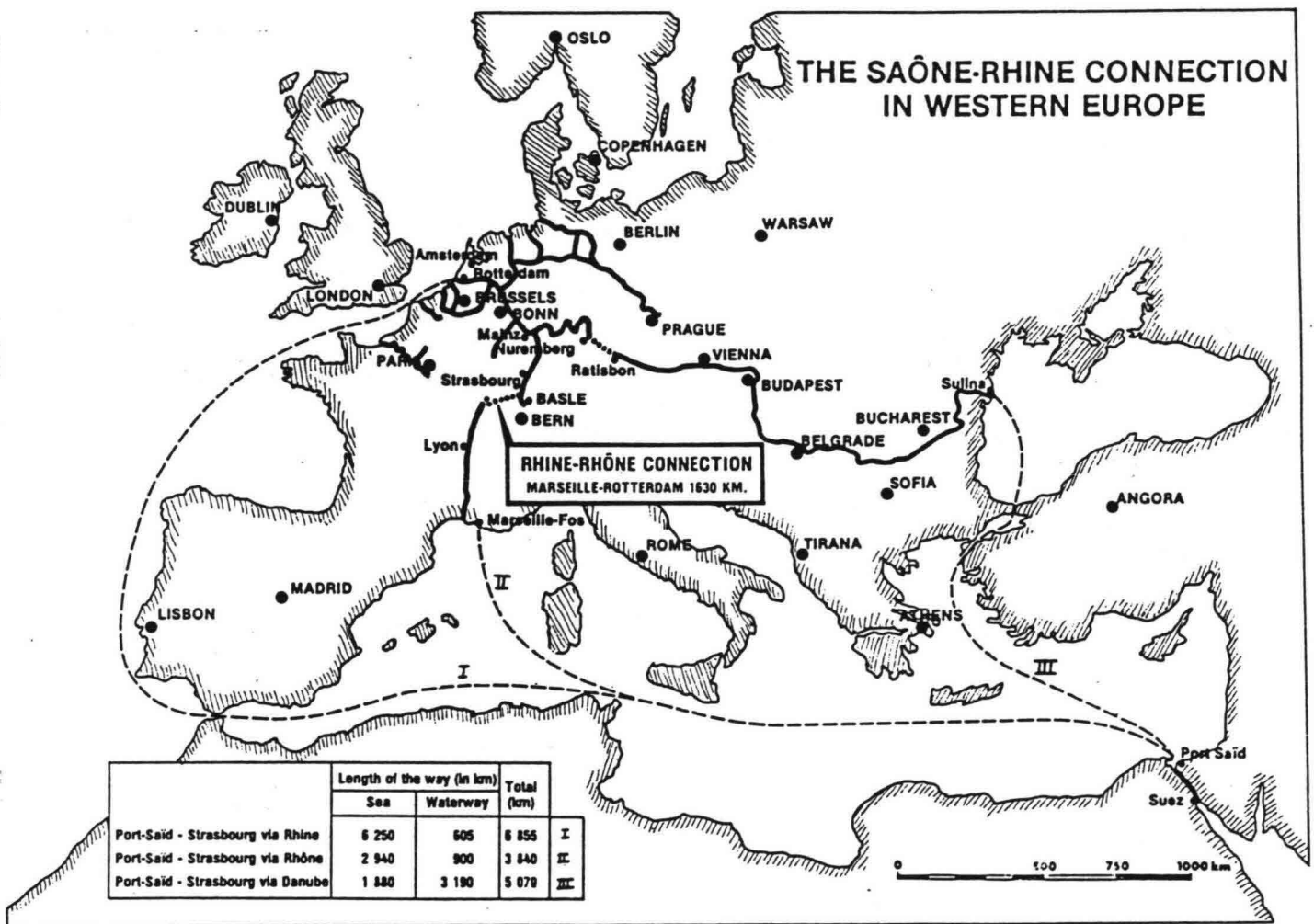
RHONE-SAONE-RIJNVERBINDING

B2.1. Inleiding

De Rhône-Saône-Rijnverbetering behelst

- de verbetering van de Rhône,
- de verbetering van de Saône en
- de aanleg van de Saône-Rijnverbinding.

Hiermee wordt een verbinding gerealiseerd vanaf Marseille aan de Middellandse Zee naar het vaarwegennet van Noord-Europa (Rijn, Donau etc.). De verbetering van de Rhône en de Saône is ondertussen achter de rug; wat rest is de verbinding met de Rijn.



Figuur 1. Vaarwegen in Europa

Hoewel in deze bijlage de Saône-Rijnverbinding wordt behandeld, is het al-lerminst zeker dat deze verbinding ook zo gerealiseerd zal worden. De projecten zijn weliswaar reeds uitgewerkt, maar stuiten naast financiële problemen (totale kosten 11,8 mld Franse frank) op belangentegenstellingen. Terwijl de noordoostelijke Franse gebieden sterk voor uitvoering zijn vreest de Middellandse zeehaven Marseille schade, omdat het Franse verkeer zich meer op de Rijn zou kunnen gaan richten en in een verder sta-

dium op de Rijn-Donau-Zwarte Zeeroute. Daarnaast wordt de moderne buitenlandse vrachtaart gevreesd en verwacht men dat het industriële zwaartepunt van Frankrijk zich meer naar het noorden zal verplaatsen.

Ook Zwitserland wil een scheepvaartverbinding met de Middellandse Zee via de Rhône. Er zijn plannen daterend uit 1965 om de rivier de Aare die in de Zwitserse Bovenrijn uitmondt geheel te kanaliseren, en via de Jurameren van Bielen, Murten en Neuchatel een verbinding tot stand te brengen met het Meer van Genève. Vanaf dat meer zou een verbinding moeten komen met de Rhône in Frankrijk. Dit plan stuit binnen Zwitserland op milieubezwaren. Verder zijn alle andere Rijnsoeverstaten voor de aanleg van de Saône-Rijnverbinding. Overigens hebben de Fransen onlangs besloten om de Rhône tot Evien (slechts 98 km westelijk van Genève) bevaarbaar te maken, mede om daar een waterkrachtcentrale te bouwen.

De onderstaande tabel geeft een globale vergelijking van beide alternatieven. Hieruit blijkt dat de verbinding via Zwitserland 74 km langer is, 213 m meer hoogteverschil moet overbruggen en 13 kanaalpanden meer noodzakelijk maakt dan de verbinding via Frankrijk.

Trajekt Lyon-Bâle	lengte	hoogteverschil	kanaalvakken
via Besancon	453 km	281 m	31
via Genève	527 km	494 m	44

Verder is de verbinding door Frankrijk al voor een groot gedeelte gerealiiseerd; de Saône is al geschikt voor grotere schepen, waardoor er nog slechts 229 km resteert (nl. de Saône-Rijnverbinding).

De Rhône-Saône-Rijnverbinding is een mooi voorbeeld, waaruit blijkt dat vroeger op zichzelf staande civieltechnische objecten tegenwoordig steeds meer deel gaan uitmaken van een groter infrastructuurproject. Veelal dient zo'n project meerdere functies, en zijn met het ontwerp en de uitvoering diverse disciplines gemoeid. Veel van deze disciplines komen in deze bijlage nauwelijks aan de orde. Dit is bij het werkelijke ontwerp uiteraard wel het geval geweest.

B2.2. Verbetering van de Rhône

Vóór de verbetering van de Rhône was de toegankelijkheid van een zeer groot gedeelte van Frankrijk beperkt. Stroomsnelheden van soms meer dan 3 à 4 m/s, bochtstralen van soms minder dan 400 m en een geringe diepte bij kleine afvoer maakten het varen op deze rivier moeilijk, gevaarlijk en duur. Zelfs in de benedenloop was het gemiddelde verhang maar liefst 60 cm/km, met gedeelten waar het verhang de waarde van één meter per km overschreed. Alleen schepen met een geringe diepgang, relatief veel vermogen en beperkte afmetingen (kleiner dan 800 ton) konden dan ook de Rhône tussen de Middellandse Zee en Lyon bevaren.

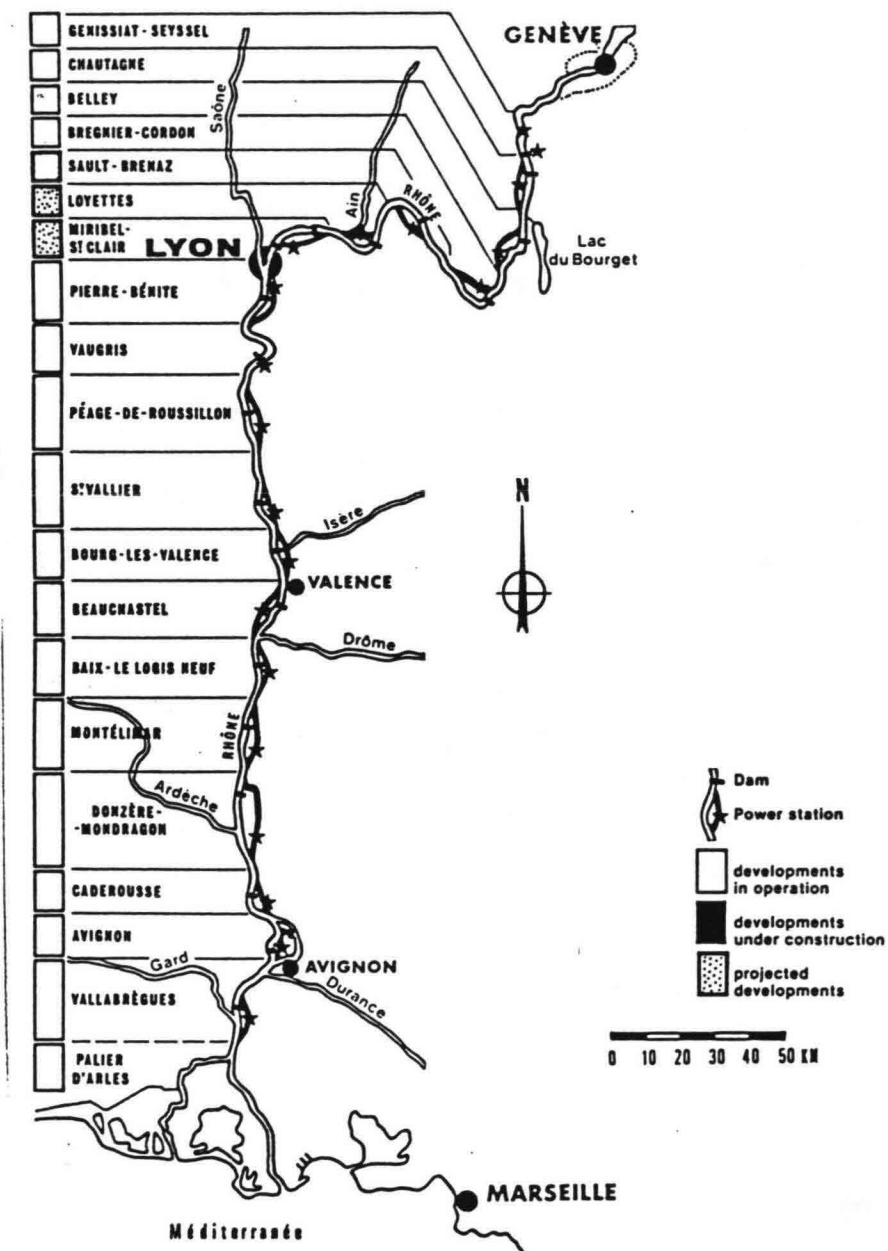
Mede met het doel om de bevaarbaarheid te verbeteren werd een groot en ambitieus plan opgesteld, wat ondermeer de aanleg van verschillende sluisen, stuwen, waterkrachtwerken en dijken behelsde.

De verbetering van de rivier de Rhône tussen de Zwitserse grens en de Middellandse Zee werd middels een op 27 mei 1921 aangenomen akte bekrachtigd. De Compagnie Nationale de Rhône (CNR) werd per besluit van 5 juni

1934 benoemd om de werken uit te voeren en de rivier te beheren. Deze maatschappij is voor 1/3 in handen van de Nationale Energiemaatschappij en de Nationale Spoorwegen en voor 2/3 van lokale organisaties. In dit besluit was vastgesteld dat de rivier zou worden verbeterd vanuit drie gezichtspunten, namelijk (in volgorde van belangrijkheid):

1. Bruikbaar maken van de **hydraulische energie**.
 2. Verbeteren van de **bevaarbaarheid**.
 3. Bevordering van de **landbouw**.
- Voorts is aandacht besteed aan hoogwaterbestrijding.

Het grootste gedeelte van dit project is inmiddels al gerealiseerd.

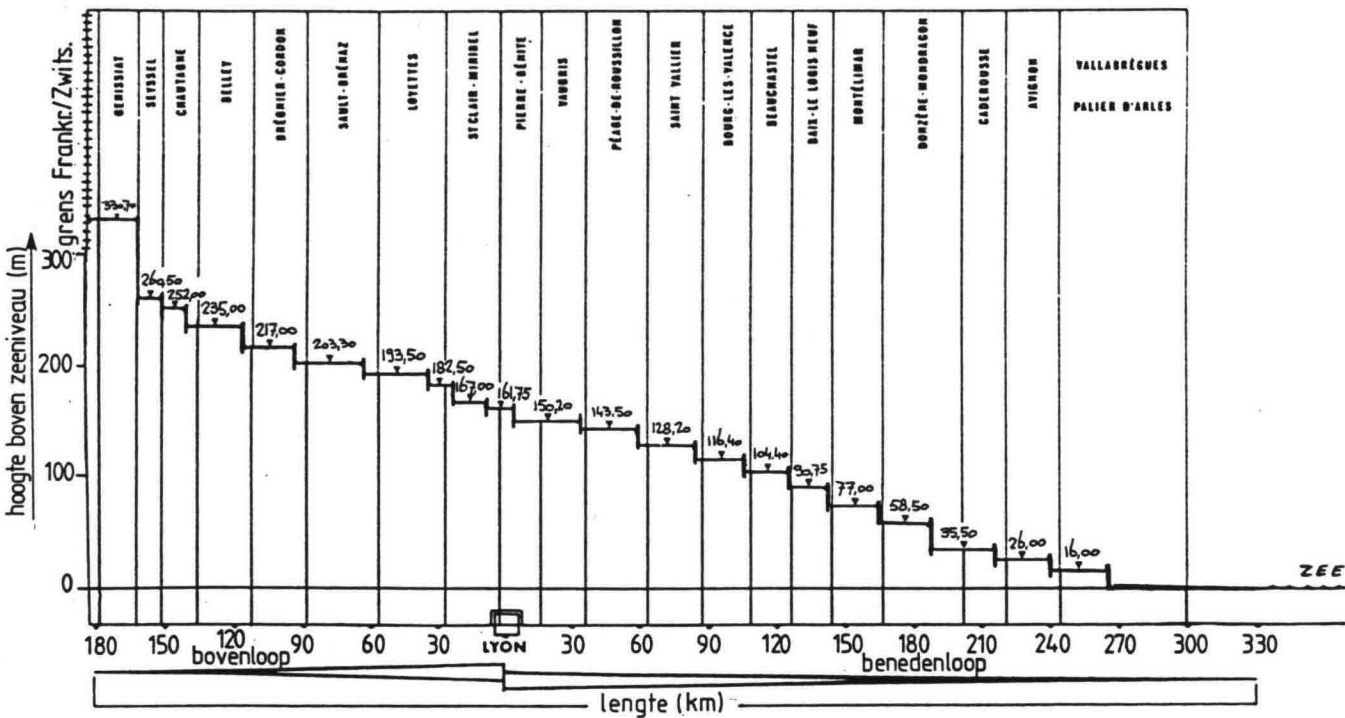


Figuur 2. Rivier de Rhône

Bij de uitvoering is onderscheid gemaakt tussen de bovenloop en de benedenloop van de Rhône, waarbij de grens bij Lyon getrokken is. Direkt na de Tweede Wereldoorlog is men bij Génissiat en Seyssel in de bovenloop van de Rhône reeds begonnen met de bouw van waterkrachtsinstallaties. Na de bouw van de dam bij Génissiat (goed voor 1820 mln kWh per jaar) kreeg de verbetering van de benedenloop de grootste prioriteit, dit in verband met het belang voor de scheepvaart tussen Lyon en de Middellandse zee.

De benedenloop van deze rivier heeft men onderverdeeld met behulp van 12 dammen; tussen de realisatie van de 1e trede van deze watertrap te Donzère-Mondragon in 1952, en de laatste te Vaugris in maart 1980 zijn 28 jaren verstreken.

Hierna volgde het bevaarbaar maken van de bovenloop over een afstand van 50 km, nl. van Lyon tot Loyettes, dit in combinatie met het voornaamste doel: het opwekken van electriciteit door middel van de bouw van nog vijf waterkrachtcentrales (samen goed voor 1800 mln kWh per jaar) tussen Génissiat-Seyssel en Lyon: Chautagne (1980), Belley (1981), Brégnier-Cordon (1984), Sault-Brénaz (1986) en Loyettes (uitgesteld).



Figuur 3. Lengtedoorsnede van de Rhône

Waterkracht

Bij de verbetering van de Rhône heeft de opwekking van hydraulische energie de hoogste prioriteit gekregen. De jaarlijkse energieproductie was in 1984 15,7 mld kWh (iets meer dan de gemiddelde produktie). Op het moment vertegenwoordigen de 19 in gebruik zijnde centrales een vermogen van meer dan 3000 MW, en produceren meer dan 20% van de Franse hydro-energie.

Alle waterkrachtwerken aan de Rhône, met uitzondering van die bij Génissiat, zijn z.g. klein verval installaties. De centrale bij Génissiat heeft

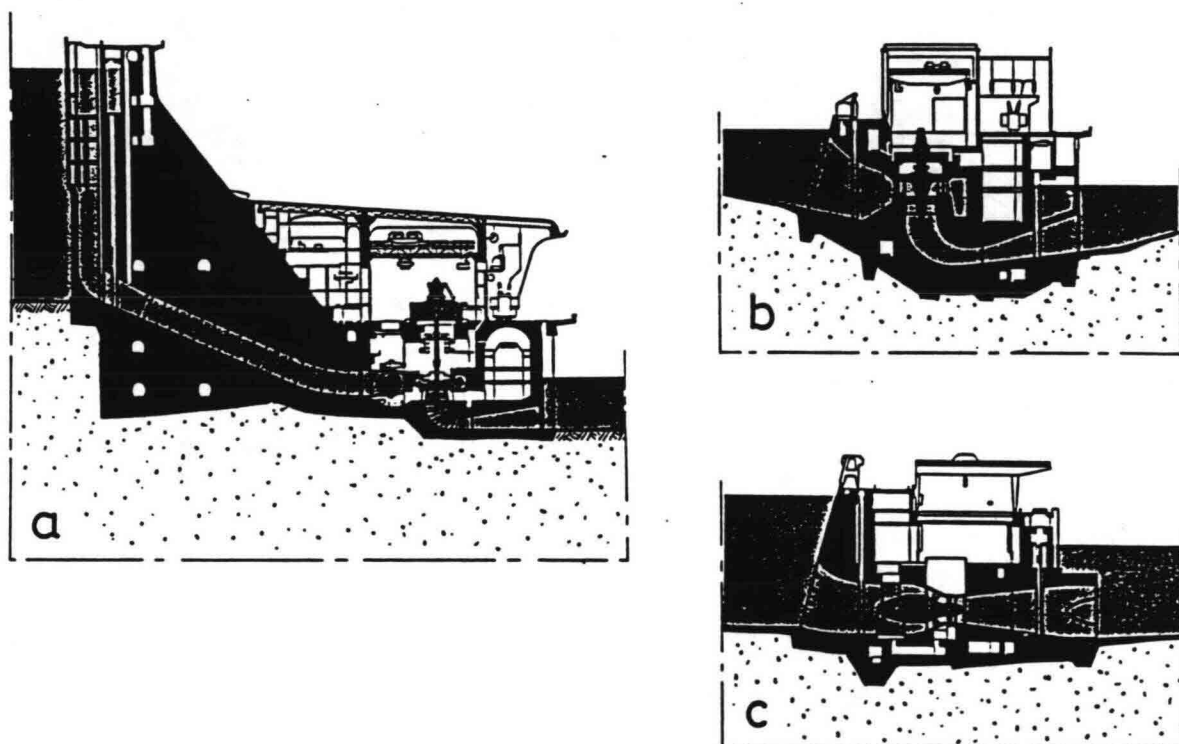
een verval van 70 m; de overige hebben een verval variërend van 6 m (Seysssel, Vaugris) tot 26 m (Bollène), waarbij de meerderheid tussen de 9 en 12 m ligt.

Globaal zijn er drie typen turbines toegepast:

- a. Medium verval installatie, uitgerust met verticale-schacht eenheden (bv. Génissiat).
- b. Klein verval installatie, uitgerust met verticale-schacht eenheden (bv. Montélimar).
- c. Klein verval installatie, uitgerust met horizontaal opgestelde bulbeen-heden met verstelbare schoepen (bv. Avignon).

Alle installaties zijn ontworpen voor volledig automatische piekstromwerking, met de mogelijkheid voor een vergroting van de opgewerkte energie met 35% voor dagelijkse 4 uur durende pieken, of met 60% voor een kortdurende extra vraag naar energie.

Uiteraard heeft men gedurende het werk veel ervaring opgedaan. Zo zijn de afmetingen van de centrales bij de achtereenvolgende projekten (zowel de breedte als de hoogte) sterk verminderd; bij de latere projekten steekt de opbouw van de centrales praktisch niet meer boven de waterspiegel uit.

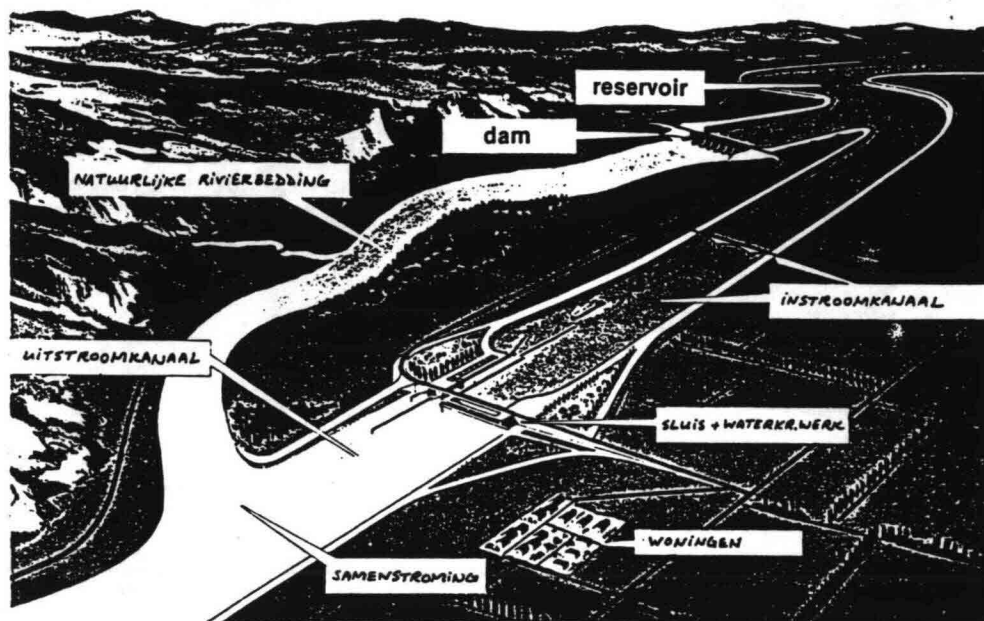


Figuur 4. De drie toegepaste typen turbines

Bevaarbaarheid

De geringe breedte van de valleien en de aanwezigheid van vele bebouwde gebieden op de oevers hebben geleid tot een verdeling van de rivier in ongeveer 20 km lange secties, welke stuk voor stuk als een apart projekt behandeld konden worden. Het doel hiervan was een aanzienlijke reductie van het verhang te krijgen, en het verval tussen het boven- en benedenstroomse gedeelte van een sectie in één punt te concentreren, waar de volgende kunstwerken werden gesitueerd:

- Een waterkrachtcentrale, welke de hydraulische energie van de rivier omzet in electriciteit.
- Een sluis naast de centrale voor de passage van de scheepvaart.
- Een dam die het benedenstroomse einde van het reservoir vormt.



Figuur 5. Principe-oplossing

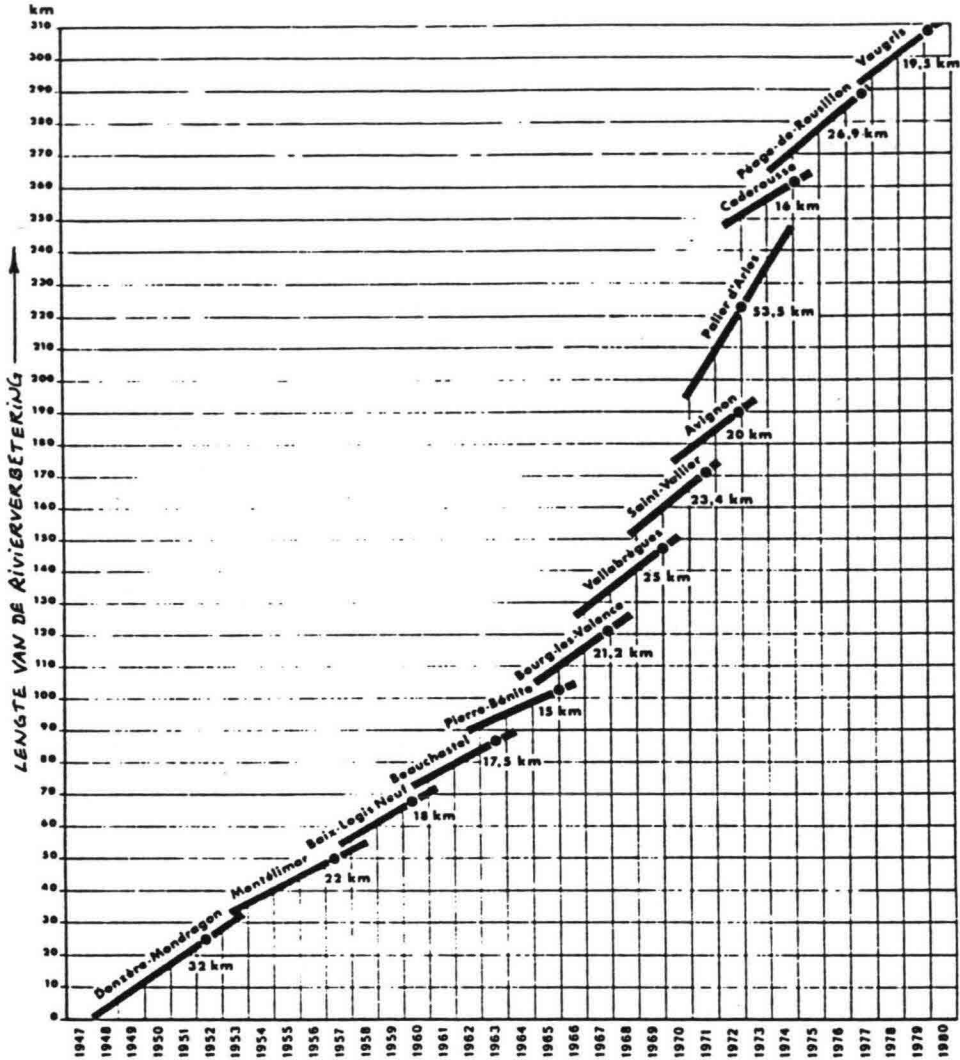
Afhankelijk van de door de lokatie opgelegde randvoorwaarden werd het waterkrachtwerk annex sluis aansluitend aan de dam gebouwd of in een omleidingskanaal, dat onmiddellijk bovenstrooms van de dam begint. Waar de vallei zeer diep en smal is (bijvoorbeeld bij Génissiat), of waar de bebouwing op de oevers zeer omvangrijk is waardoor er geen ruimte meer is voor een omleidingskanaal (Seyssel en Vaugris), wordt het waterkrachtwerk, de sluis en de dam in één kunstwerk gecombineerd aan het benedenstroomse einde van de betreffende riviersectie. Het benodigde verval bij het waterkrachtwerk wordt in dit geval verkregen door de waterstand bovenstrooms van het werk extra te verhogen. In het geval waarbij een omleidingskanaal is toegepast wordt het verval mede verkregen door het geringere verhang in het kanaal ten opzichte van dat van de rivier. De combinatie waterkrachtwerk/sluis is doorgaans gesitueerd op een plaats waar het benodigde grondverzet minimaal is.

De vermindering van het verhang werd verkregen door een vermindering van de stroomsnelheid, met andere woorden door vergroting van het doorstroomprofiel. Dit is op verschillende manieren gerealiseerd:

- Het maken van een reservoir dat dieper en breder is dan het oorspronkelijke rivierbed.
- Het creëren van grote omleidingskanalen.
- Baggeren van de rivierbodem.

Deze methoden zijn gewoonlijk gecombineerd gebruikt.

In figuur 6 is het verloop van de verbetering van de benedenloop van de Rhône in de tijd weergegeven. Voor elk project is de tijdsduur van het begin van het werk tot de inwerkstelling van het laatste onderdeel uitgezet. Het teken ● duidt het tijdstip van onderwaterzettingen aan.



Figuur 6. Verbetering van de benedenloop van de Rhône

Bij het verbeteren van de Rhône heeft men de kunstwerken gedimensioneerd op een maximale scheepslengte van 180 à 190 m en een breedte van 11,40 m (d.w.z. 2-baks duwvaart in gestrekte formatie). Derhalve zijn alle hier gebouwde sluisen 195 m lang en 12 m breed.

De gegarandeerd aanwezige diepte is 3 m. De doorvaarthoogte is bijna overal groter dan 7 m, met uitzondering van nog enkele bruggen die er de oorzaak van zijn dat de benedenloop van de Rhône bevaarbaar is voor schepen lager dan 6 m. De kanaalbreedte is minimaal 60 m en de toegepaste bochtstralen zijn doorgaans groter dan 1000 m. De stroomsnelheid ligt meestal tussen 0,5 en 1 m/s.

De Rhône is hiermee beter bevaarbaar geworden dan bijvoorbeeld de Rijn; de mogelijke capaciteit was na het gereedkomen van de benedenloop in 1980 ca. 20 miljoen ton vracht per jaar, terwijl in dat jaar 4,5 mln ton daadwerkelijk over de Rhône vervoerd werd.

Hierbij dient nog opgemerkt te worden, dat de rivier nog steeds niet optimaal wordt benut. De diepte is bijvoorbeeld bijna overal veel groter dan 3 m, en indien men ertoe over zou gaan om grotere en diepere sluizen te bouwen naast de "oude", dan kan de capaciteit van de Rhône nog drie keer zo groot worden. De rivier zou dan met niet veel meer werk dan het baggeren over 17% van de totale lengte bevaarbaar worden voor duwconvooien van 10.000 tot 15.000 ton.

Overigens is de omvang van de scheepvaart niet spectaculair. De vloot op de benedenloop van de Rhône bestond in 1984 uit 46 zelfvaarders (motorvrachtschepen en tankschepen), 7 duwboten met 21 bakken en 6 kruiplijncoasters. In dat jaar werd 3,42 mln ton lading vervoerd (333,3 mln tonkm).

Landbouw

Langs bijna de gehele rivier de Rhône heerst een gunstig klimaat voor landbouw en er liggen zeer vruchtbare gebieden langs de oevers. De werken uitgevoerd ter verbetering van de Rhône kosten relatief veel landbouwgrond. Teneinde dit verlies zoveel mogelijk te compenseren en om nuttig gebruik te maken van de nieuwe mogelijkheden voor irrigatie, heeft men een derde functie aan de CNR toegewezen: landbouwontwikkeling. Het gaat hier ondermeer om ruilverkaveling, verbetering van het wégennet, irrigatie en drainage. Hier wordt verder niet op ingegaan.

Overige infrastructuur

Gelijktijdig met de verbetering van de vaarweg heeft men ook autowegen (A6, A7) volgens dezelfde route aangelegd en de spoorwegverbinding Parijs-Lyon-Marseille verbeterd. Ook zijn er pijpleidingen en reservoirs aangelegd voor opslag en transport van petrochemische produkten. Hiermee heeft men gepoogd een nieuw achterland te creëren met dezelfde karakteristieken als dat van de Rijn; elke moderne industrie heeft er immers voordeel bij om zich bij grote verkeersaders te vestigen. De ontwikkelingen tot nu toe lijken dit te bevestigen.

De waterweg doorkruist diverse gebieden waar de industriële activiteiten al vrij groot waren; de verpaupering is hiermee voorkomen. Bovendien heeft de uitbreiding van industrieterreinen nieuwe bedrijvigheid aangetrokken.

Naast de infrastructuurverbetering dient tevens gezorgd te worden voor vergroting van de laad- en losgelegenheid in de nabijheid van grote steden en bestaande industrieën. Derhalve heeft men naast de haven Edouard-Harriot nog acht haventerreinen aangelegd, te weten bij Loire-sur-Rhône, st.Romain-en-Gal, Salaise-Sablons (Péage de Roussillon), Valence, Montélimar, Avignon-Courtine, Beaucaîne, Tarascon en Arles-Nord. Deze terreinen vertegenwoordigen bijna 500 ha aan ca. 30 km rivieroever. De havens hebben een verbinding met de spoorlijn Parijs-Lyon-Marseille en met bestaande autowegen.

Een modern haventerrein aan de Rhône bestaat in principe uit:

- Een groot opslagterrein, waarvan de kale grond verpacht is aan bedrijven die vrij intensief van het vervoer over water gebruik maken. Deze bedrijven bouwen zelf hun opslagcentra en zorgen voor hun eigen materieel om de goederen/vracht te verwerken.
- Een terrein met een gemeenschappelijke laad- en losgelegenheid ten behoeve van niet aan het water gelegen bedrijven.

Deze twee terreinen grenzen doorgaans aan een industrieterrein.

B2.3. Verbetering van de Saône

In 1981 kreeg de CNR de opdracht om de Saône-Rijnverbinding te construeren. Dit hield ook in dat de Saône diende te worden verbeterd, zodat de Saône en de Rhône samen al een waterweg van $190 + 310 = 500$ km zouden vormen, toegankelijk voor schepen tot 1500 ton en duwconvoeien van 3000 tot 5000 ton. In tegenstelling tot de Rhône was de Saône al goed onderhouden en door het geringe verval relatief simpel aan te passen.

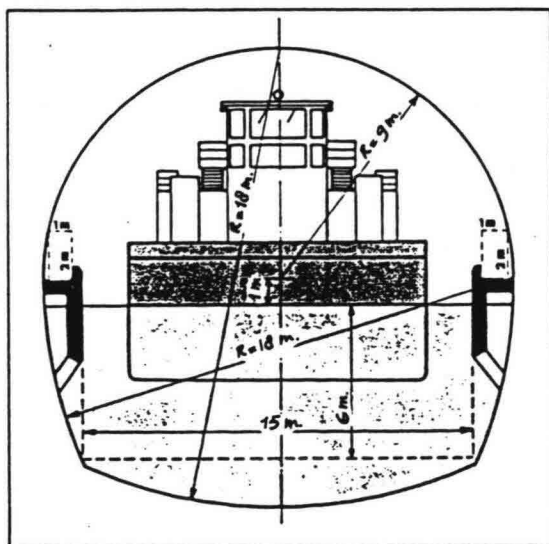
Na de verbetering is de vaarwegbreedte nu minimaal 40 m, met in de bochten een verbreding van $16.000/R$ m (waarin R de bochtstraal). De diepte is minimaal 4 m, en de sluisgrootte is 185×12 m.

B2.4. De Saône-Rijnverbinding

Een Saône-Rijnverbinding is niets nieuws. Er bestaat al een verbinding, namelijk het Rhône-Rijnkanaal. Dit is een 230 km lang zeer oud en klein kanaal dat loopt van Saint-Symphorien aan de Saône tot Niffer aan het Canal d'Alsace. De meest recente modernisatie stamt uit 1921, het heeft maar liefst 112 sluizen en kan alleen bevaren worden door schepen van de categorie tot 300 ton.

Het door het CNR uitgewerkte projekt behelst de vervanging van dit kanaaltje door een moderne versie waarin het aantal sluizen gereduceerd is tot 24 en dat toegankelijk moet zijn voor schepen van 1500 ton en duweenheden van tenminste 4000 ton en 3 m diepgang.

De totale lengte van deze verbinding is 229 km. Het behelst 23 panden met een totaal verschil in waterstand van 264 m. Meer dan de helft (128,5 km) zal bestaan uit door de mens gegraven kanalen. De benodigde civieltechnische werken zijn ondermeer de konstruktie van 24 sluizen, 15 dammen, 10 pompstations, 76 verkeersbruggen, 11 spoorbruggen, 128,5 km kanaal, 10 km kademuur, alsmede het verwijderen van rots, het baggeren van de rivier, het maken van 2 diepe doorgravingen en een 1100 m lange tunnel bij Besançon. Met de werken zullen $2,6$ mln m^3 beton en 74 mln m^3 grondverzet gemoeid zijn.



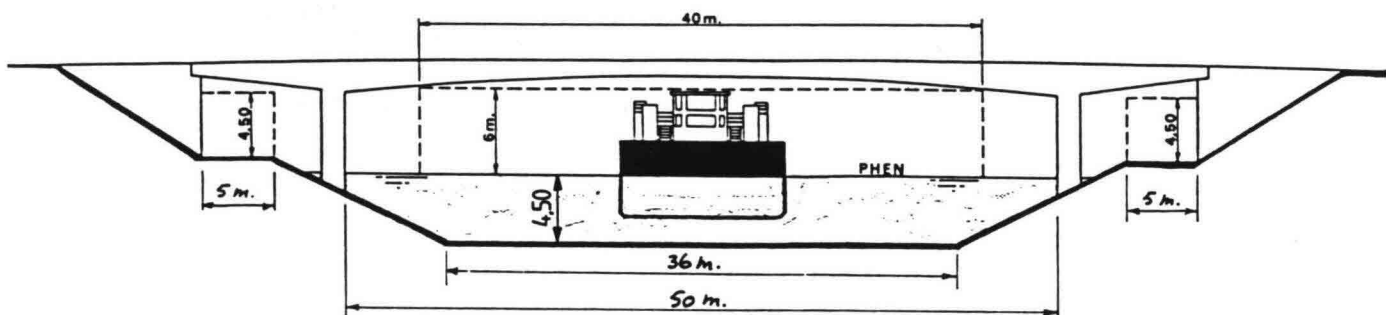
Figuur 7. Tunnel bij Besançon

De uitvoeringsduur van dit projekt wordt geschat op 12 jaar; de aanvangsdatum is nog niet vastgesteld (vooropgesteld dat dit alternatief gekozen wordt). Wel is de CNR al begonnen met de aanleg van een 15 km lang kanaal dat Mulhouse met de Rijn verbindt en dat de eerste aanzet kan worden voor het kanaal naar de Saône.

Bij ontwerpstudies voor deze verbindig is onder andere uitgegaan van de eis om het effect van de werken op de omgeving tot een minimum te beperken. Derhalve heeft men waar mogelijk het tracé van het al bestaande Rhône-Rijnkanaal gevolgd.

Het gekozen tracé loopt eerst van Niffer aan de Rijn, waar een nieuwe sluis gebouwd zal worden, tot Mulhouse; dit gedeelte vereist een modernisering van het Unigue-kanaal. Vervolgens loopt het tracé door de Illvallei tot Illfurth en door de Largue-vallei tot Wolfersdorf. Het bereikt de rand van het stroomgebied bij Valdieu-Lutran. Aan de noordzijde van de waterscheiding zijn 7 sluizen geprojecteerd met relatief groot verval en op korte afstand van elkaar. De totale lengte van deze sectie is 44,4 km en het totale verschil in waterpeil is 106,2 m. Na het hoogste pand, hetgeen zich uitstrekt over ca. 12,2 km tussen Valdieu-Lutran en Froidefontaine, stroomt de waterweg door de Bourbeuse-, de Allan- en uiteindelijk de Doubsvallei. De lengte van deze sectie is 159,6 km; hierin zijn 16 sluizen geprojecteerd die gezamenlijk een waterstandsverschil van 143,5 km moeten overbruggen. Met uitzondering van de drie bovenstroomse panden komt dit neer op kanalisatie van de Doubs. Het laatste, ongeveer 13,3 km lange pand, snijdt door de plateaus tussen de Doubs en de Saône om zich na een sluis met 14,2 m verval bij de laatstgenoemde te voegen.

Het kanaal is ontworpen voor duweenheden tot 183 m; een dergelijke duweenheden bestaat uit een duwboot van 20 m lengte en twee bakken van 76,5 x 11,40 m en kan 4400 ton vracht vervoeren bij een diepgang van 3 m. Het kanaal is 4,50 m diep. Het heeft op de waterlijn een breedte van 55 m met uitzondering van sommige gedeelten door de bebouwde kom waar de breedte kleiner kan zijn door de toepassing van verticale kademuren. Ook hier wordt in de bochten een grotere breedte aangehouden (16.000/R extra). De doorvaarthoogte onder de bruggen is minimaal 6 m.



Figuur 8. Dwarsprofiel van het kanaal

Aansluitend zijn de sluizen 185 m lang, 12 m breed en minimaal 5 m diep; wanneer men het kanaal zou verdiepen zijn de sluizen zonder verdere aanpassingen ook geschikt voor duweenheden met een diepgang van 4 m.

THE SAÔNE-RHINE WATERWAY

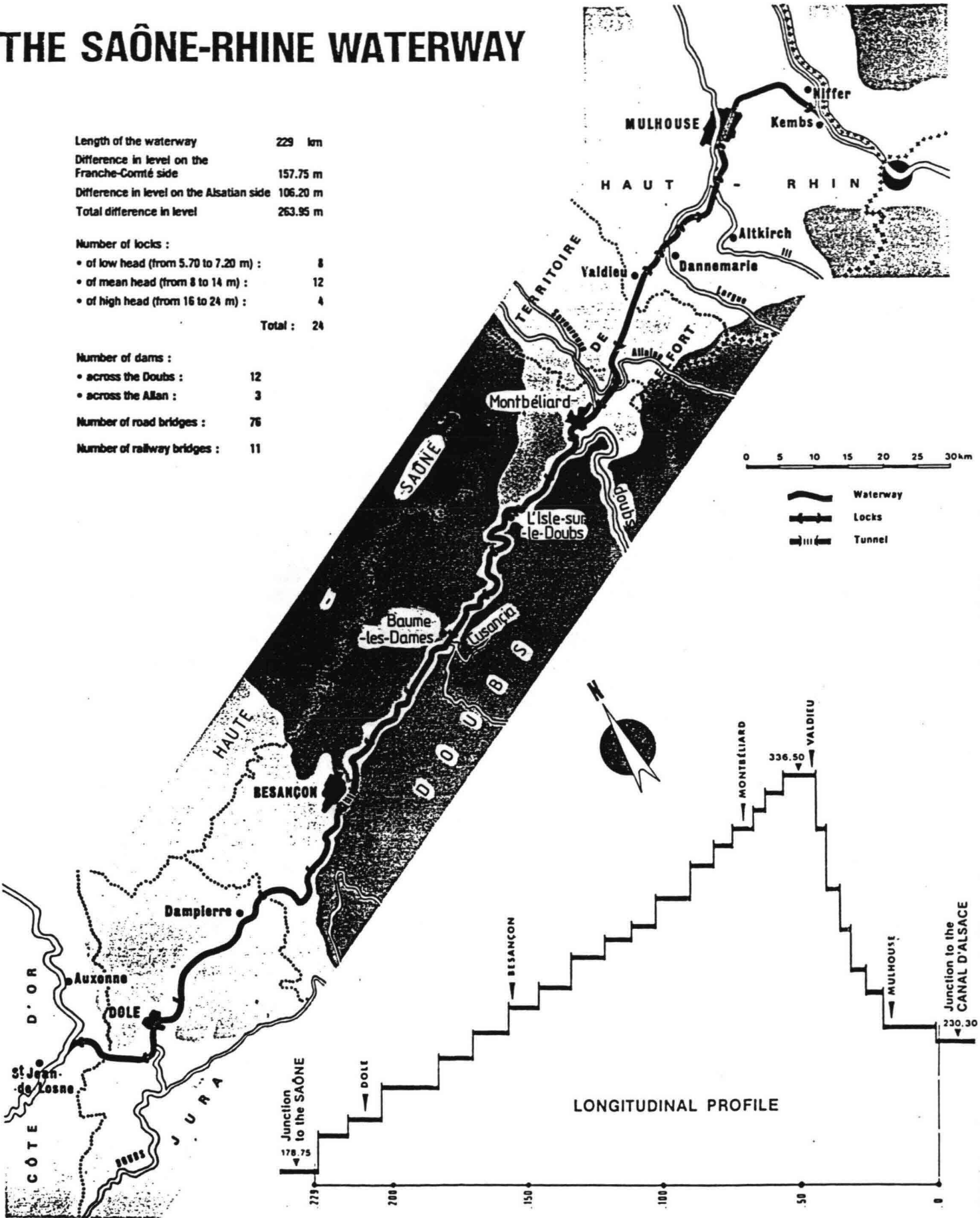
Length of the waterway	229 km
Difference in level on the Franche-Comté side	157.75 m
Difference in level on the Alsatian side	106.20 m
Total difference in level	263.95 m

Number of locks :	
• of low head (from 5.70 to 7.20 m) :	8
• of mean head (from 8 to 14 m) :	12
• of high head (from 16 to 24 m) :	4
Total :	24

Number of dams :	
• across the Doubs :	12
• across the Allain :	3

Number of road bridges : 76

Number of railway bridges : 11



Figuur 9. De Saône-Rijnverbinding

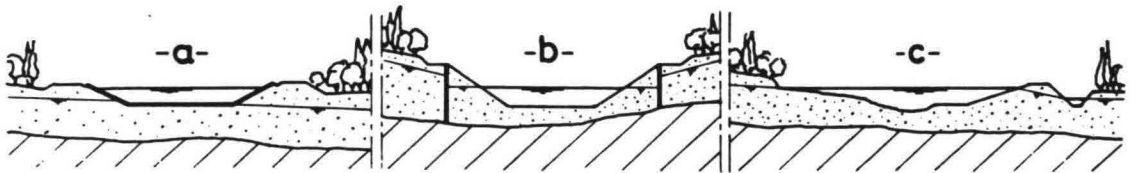
Voor de **aanvulling van water** kan men bij het hoogste pand gebruik maken van kleine instromende beken en rivieren, maar dit is niet voldoende om de grote hoeveelheid water die bij elke schutting gebruikt wordt te compenseren. Om het waterverlies te beperken wordt er bij de sluizen met groot verval (> 16 m) een spaarkom toegepast. Pompstations grenzend aan de sluizen aan weerszijden van het hoogste pand pompen het toch nog verloren gegane water 's nachts weer naar het hoogste niveau terug. Op deze manier is men ervan verzekerd dat er geen watertransport plaatsvindt van de ene kant van de waterscheiding naar de andere.

Benedenstrooms van Voujeaucourt volgt de nieuwe verbinding de bedding van de Doubs. Hier is de laagwaterafvoer al vele malen groter dan voor de bediening van de sluizen nodig zou zijn. Ondanks dit zullen, om in periodes van droogte een minimum debiet van $6 \text{ m}^3/\text{s}$ te kunnen handhaven in de niet bevaren meanders van de Doubs, de sluizen bij de langste omleidingen voorzien worden van een spaarkom. De afvoer kan dan bij eventuele chemische of biologische verontreiniging van het water opgevoerd worden tot maximaal $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Daarbij is ook zorgvuldig bekeken wat het effect van de nieuwe Saône-Rijnverbinding op de **grondwaterstand** kan zijn. De maatregelen die genomen worden om het grondwaterniveau te beheersen zijn de volgende:

- Indien het kanaal in ophoging is, wordt het voorzien van een waterdichte bekleding.
- Indien het kanaal in ingraving wordt uitgevoerd, wordt een scheiding aangebracht tussen het hooggelegen grondwater en het waterpeil op het kanaal.
- Bij gekanaliseerde rivierstukken wordt aan de voet van de dijk een kwelsloot aangelegd om het grondwaterniveau daarachter voldoende laag te houden.

Tenslotte dienen alle noodzakelijke voorzieningen te worden getroffen om te voorkomen, dat de werking van de **drinkwaterpompstations** door het nieuwe kanaal zal worden beïnvloed.



Figuur 10. Beheersing van het grondwaterniveau

Wat betreft de plaatsing van de werken in het landschap zijn regels opgesteld ter bescherming van het **natuurlijk milieu**. Enige significante voorbeelden zijn:

- Nieuw gevormde plateaus dienen aangevuld te worden met tijdens ontgravingen vrijgekomen vruchtbare grond en de oeverbescherming moet worden uitgevoerd met rotssteen uit lokale steengroeven, zodat op plateaus en oevers vergelijkbare plantengroei kan plaatsvinden als voor de aanleg.
- Bovendien zijn er in gebieden waar men bewegingen van grote zoogdieren (beren, herten) heeft waargenomen, plaatselijk aanpassingen van de vorm en het uiterlijk van de oevers ontworpen. Dit geldt met name voor de oevers van de Doubs.
- Tevens zijn er voorzieningen getroffen om de waterkwaliteit en de visstand bestand van de Doubs te handhaven. Dit tracht men ondermeer te bereiken door re-oxidatie van het door de kunstwerken stromende water,

- het planten van riet en de bescherming van paaigronden.
- Archeologisch belangrijke gebieden die mogelijk door de nieuwe werken kunnen worden vernietigd, worden voortijdig ontgraven.
 - Er worden specifieke maatregelen getroffen betreffende de architectonische kwaliteit van de betonwerken en hun inpassing in het landschap.
 - Wanneer de verbinding door steden of dorpen loopt, is ter plaatse speciale zorg besteed aan de inpassing in het stads- respectievelijk dorpsgezicht.
 - Tenslotte moeten op het water en nabij de oevers verschillende vormen van recreatie mogelijk zijn, zoals op de Doubs op dit moment al het geval is. Gedacht kan worden aan roeien, vissen, wandelen, fietsen en dergelijke. Verder bieden grote watervlakten (tot enkele honderden hectares) de mogelijkheid voor de plaatselijke autoriteiten om verschillende soorten waterrecreatie en -sport te ontwikkelen.

Het wachten is nu nog op de beslissing om dit projekt doorgang te laten vinden. Zoals reeds in de inleiding is gememoreerd, staat dit nog allerm minst vast.

