

Modulenaam: Inleiding Waterbouwkunde

Modulecode: CT 2320

Datum: 01 – 2011

TU Delft
Faculty CiTG

K.G. Bezuyen
M.J.F. Stive
G.J.C. Vaes
J.K. Vrijling
T.J. Zitman

© Delft University of Technology • Faculty of Civil Engineering and Geosciences •
Section of Hydraulic Engineering

On behalf of the Section of Hydraulic Engineering published by:

VSSD

Leeghwaterstraat 42, 2628 CA Delft, The Netherlands

tel. +31 15 278 2124, telefax +31 15 278 7585, e-mail: hlf@vssd.nl

internet: <http://www.vssd.nl/hlf/ct2320.htm>

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave.....	i
1 Inleiding.....	1
1.1 Algemeen.....	1
1.2 Begripsbepaling.....	1
1.3 Waterbouwkunde en Civiele Techniek.....	2
1.4 Relatie met andere vakgebieden.....	3
1.5 Indeling dictaat.....	4
2 Ontwerpen in de waterbouw.....	7
2.1 Het ontwerpproces.....	7
2.2 Vooronderzoek en Programma van Eisen.....	8
2.3 Randvoorwaarden.....	9
2.4 Basisideeën en alternatieven.....	11
2.5 Afwegen van alternatieven.....	14
2.6 Principes van het probabilistisch ontwerpen.....	17
2.7 Economische analyse.....	20
2.8 Ecologie.....	22
2.9 Milieuaspecten.....	25
2.9.1 Duurzame ontwikkeling.....	25
2.9.2 Gebieden voor Milieuzorg.....	25
2.10 Vormgeving en architectuur.....	27
2.11 Aanbevolen literatuur.....	30
3 Basisbegrippen.....	31
3.1 Inleiding.....	31
3.2 Astronomische getijden en Coriolis.....	31
3.2.1 Evenwichtsgetij.....	31
3.2.2 Getijvoortplanting.....	37
3.2.3 Coriolis.....	40
3.3 Bepaling van waterstanden.....	42
3.3.1 Opwaaiing.....	42
3.3.2 Extreme hoogwaterstanden.....	46
3.4 Vloeistofmechanica open waterlopen.....	52
3.4.1 Continuïteit, Bernoulli en de impulsbalans.....	52
3.4.2 Invloed van wrijving in een waterloop.....	54
3.4.3 Stroming door afvoerconstructies.....	59
3.4.4 Golven.....	63
3.4.5 Golven op taluds.....	73
3.5 Vloeistofmechanica gesloten waterlopen.....	80
3.5.1 Stroming in gesloten leidingen.....	80
3.5.2 Energieopwekking uit waterkracht.....	85
3.6 Stabiliteit van sediment en steen.....	86
3.6.1 Sedimenttransport.....	86
3.6.2 Stabiliteit bij stroomaanval.....	89
3.6.3 Stabiliteit bij golfaanval.....	91
3.7 Grondmechanica.....	93
3.7.1 Zettingen.....	93
3.7.2 Afschuiving.....	94
3.7.3 Opbarsten.....	95
3.7.4 Piping.....	96
3.7.5 Zettingsvloeiing.....	99
3.8 Voorbeeld krachtsoverdracht waterkerende constructie.....	100
3.9 Aanbevolen literatuur.....	106
4 Natuurlijke waterlopen.....	107
4.1 Inleiding.....	107
4.2 Hydrologische aspecten.....	107
4.3 Regulering van het rivierbed.....	112

4.3.1	Tijdelijke reguleringswerken	112
4.3.2	Permanente reguleringswerken	116
4.4	Regulering van de waterafvoer	126
4.5	Regulering van de waterstanden	126
4.5.1	Doel van waterstandsregulering	126
4.5.2	Peilbeheersing	127
4.5.3	Waterafvoer	131
4.5.4	Scheepvaartdoorlaat	131
4.5.5	Doorvoer van vaste stoffen	132
4.5.6	Vistrek	133
4.5.7	Energiebenutting	134
4.6	Verbetering van een riviertraject A - B	135
4.6.1	Toetsing van oplossingsprincipes	135
4.6.2	Keuzebepaling van oplossingsprincipes	139
4.7	Aanbevolen literatuur	139
5	Kunstmatige waterlopen	141
5.1	Open waterlopen	141
5.1.1	Inleiding	141
5.1.2	Kanalen voor watertransport	142
5.2	Gesloten waterlopen (leidingen)	146
5.2.1	Inleiding	146
5.2.2	Combinatie van pomp en leiding	147
5.2.3	Waterslag en leidingbreuk	147
6	Constructies ten behoeve van rivierregulering: stuwen	149
6.1	Vaste stuwen: stuwdammen	149
6.2	Beweegbare stuwen	154
6.2.1	Definitie beweegbare stuw	154
6.2.2	Onderbouw beweegbare stuw	155
6.2.3	Bovenbouw beweegbare stuw	156
6.3	Aanbevolen literatuur	159
7	Scheepvaart	161
7.1	Inleiding	161
7.2	Scheepvaart als onderdeel van het logistieke proces	162
7.3	Zeescheepvaart	164
7.3.1	Ontwikkeling zeescheepvaart	164
7.3.2	Specifieke kenmerken zeeschip	166
7.3.3	Typen zeeschepen	167
7.4	Binnenscheepvaart	174
7.4.1	De binnenvaartsector	174
7.4.2	Typen binnenvaartschepen	174
7.4.3	Ontwikkelingen binnenvaart	180
7.5	Hydronautische aspecten van het varen	182
7.5.1	Waterbeweging rond een varend schip	183
7.5.2	Sturen, roer, boegschroef, padbreedte	188
7.5.3	Voortstuwing	189
7.5.4	Stoppen en afmeren	189
7.5.5	Invloed van wind en stroom	190
7.6	Kanalen voor de scheepvaart	191
7.6.1	Eisen	191
7.6.2	Richtlijnen	192
7.6.3	Ontwerp	192
7.7	Aanbevolen literatuur	195
8	Constructies ten behoeve van de scheepvaart	197
8.1	Constructies ten behoeve van laden en lossen	197
8.2	Constructies ten behoeve van overwinning van verval	202
8.2.1	Inleiding	202
8.2.2	Oplossingsprincipes overwinning van verval	202
8.2.3	Keuzebepaling overwinning van verval	212
8.2.4	Beknopte uitwerking schutsluis	214
8.3	Aanbevolen literatuur	218

9	Bescherming tegen water	219
9.1	Geschiedenis Nederlandse waterbouw.....	219
9.2	Uitvoering van het Deltaplan	230
9.3	Waterkeringen: definities en systemen	252
9.4	Hoogwaterproblematiek	256
9.5	Aanbevolen literatuur.....	261
10	Kustmorfologie en duinen	263
10.1	Inleiding	263
10.2	Kusttypen	265
10.3	Basisprocessen aan de kust.....	267
	10.3.1 Kustbewegingen.....	267
	10.3.2 Stromingen aan de kust.....	268
	10.3.3 Profiel brandingszone	269
	10.3.4 Kustlangs sedimenttransport	271
10.4	Harde en zachte interventies aan de kust.....	273
10.5	Aanbevolen literatuur.....	276
11	Dijken en (haven)dammen	277
11.1	Algemene beschrijving van een dijk	277
11.2	Definities van peilen en niveaus	278
11.3	Faalmechanismen van dijken	280
11.4	Elementen van het ontwerp	281
11.5	Bodem- en oeverbescherming	287
	11.5.1 Kenmerken bekledingsconstructie	287
	11.5.2 Soorten filters.....	289
	11.5.3 Functies van filters.....	290
	11.5.4 Ontwerpregels geometrisch-dichte filters.....	292
11.6	(Haven)dammen.....	296
11.7	Aanbevolen literatuur.....	298
	Bijlage A: Wetgeving ter bescherming van het milieu	299
A.1	Overheidsbeleid.....	299
A.2	Nederlandse milieuwetgeving.....	300
A.3	Internationale conventies	300
	Bijlage B: De centrifugaalpomp	303
	Bijlage C: Stuwtypen	309
C.1	Klepstuw.....	309
C.2	Dakstuw	310
C.3	Sectorstuw	311
C.4	Schotbalkstuw.....	311
C.5	Schuivenstuw.....	312
C.6	Segmentstuw	313
C.7	Vizierstuw.....	314
	Bijlage D: Spiegeldaling	317
	Bijlage E: Granulaire analyse grondmonsters	322
E.1	Zeefmethode.....	322
E.2	Draad- en plaatzeven	324
	Literatuurlijst	326

1 Inleiding

1.1 Algemeen

In het college CT2320 - Inleiding Waterbouwkunde - wordt een breed overzicht gegeven van de verschillende aspecten van het vak Waterbouwkunde. Dit houdt in dat informatie wordt gegeven over ontwerp en uitvoering van allerlei soorten waterbouwkundige werken. Door de breedte van het onderwerp zal de diepgang in dit inleidende college beperkt moeten blijven. De nadruk zal worden gelegd op begrip, terwijl voor het kwantificeren veel gebruik zal worden gemaakt van vuistregels.

In de verschillende vervolgcollages in het 3^e, 4^e en 5^e studiejaar zal dieper op de theoretische achtergronden worden ingegaan, zoals rivieren, flexibele constructies, scheepvaartwegen en havens, kustwaterbouw, afsluiting van getijgeulen, energiewaterbouw, etc. Wat betref de breedte kan worden opgemerkt dat de hydrologie evenals offshore constructies niet in dit dictaat ter sprake komen. Hydrologische aspecten worden apart behandeld in het 1^e jaars college CT1310 Hydrologie, en voor offshore constructies wordt verwezen naar de desbetreffende mastervakken van de gelijknamige opleiding.

De inhoud van dit dictaat moet daarom niet worden gebruikt als handleiding bij het maken van een ontwerp, hooguit als hulpmiddel om een eerste ruwe schets op te zetten.

De meeste collegedictaten van de sectie Waterbouwkunde die bestemd zijn voor 3^e, 4^e en 5^e jaars colleges zijn geschreven in de Engelse taal. Voor dit dictaat is daarvan bewust afgeweken om de begrippen en vaktermen te introduceren. Technische woordenlijsten Nederlands - Engels zijn te raadplegen van de internetsite www.kennisbank-waterbouw.nl.

1.2 Begripsbepaling

Waterbouwkundige werken: antwoord op behoeften van de buitenwereld

Een (onvolledige) definitie van Waterbouwkunde luidt:

Waterbouwkunde omvat de kennis van en de leer omtrent het ontwerpen, aanleggen en onderhouden van werken die dienen om beken, rivieren, meren en zeeën binnen vooraf aangegeven grenzen te fixeren of af te leiden, alsmede werken gerelateerd aan scheepvaartwegen, afwatering- en irrigatiesystemen en oeververbindingen. Waterbouwkundige werken worden steeds ontworpen als antwoord op een behoefte van de buitenwereld inzake de materiële infrastructuur, voor zover deze betrekking heeft op water in enigerlei vorm.

Het vakgebied van de waterbouwkunde omvat:

Scheepvaartwegen en -voorzieningen

Hieronder vallen wegen en voorzieningen voor het vervoeren over water van personen en goederen met schepen, laden en lossen, meren en geleiden van schepen, omhoog en omlaag brengen van schepen bij verval en het maken, respectievelijk bevaarbaar maken en houden van rivieren, kanalen en havens. De werken kunnen zowel t.b.v. de binnenvaart als de zeevaart en zowel t.b.v. de beroeps- als de recreatievaart dienen.

Waterbeheersingssystemen ten behoeve van de landbouw: polders en irrigatie

Het gaat hier om werken voor aanvoeren, inlaten, transporteren, opslaan en verdelen van water, het afvoeren van water zoals uit neerslag en kwel en ook het bevoelen met (slibrijk) water.

Energieopwekkings- en opslagsystemen

Hieronder worden werken begrepen voor het benutten van waterkracht (verval en debiet) voor het omzetten van potentiële energie van water in elektrische energie. Hieronder vallen ook de energiewinning uit golfbeweging en uit de temperatuurgradiënt van water.

Wateronttrekkings- en opslagsystemen

Hiermee worden werken bedoeld t.b.v. het onttrekken, opslaan en transporteren van water voor drinkwater- en industriewatervoorziening (koel- en proceswater) en het afvoeren van gebruikt water. Het zuiveren van water (drinkwater, afvalwater), drinkwaterleidingen en rioleringen behoren tot het terrein van de civiele gezondheidstechniek.

Bescherming tegen (hoog)water en erosie

Dit betreft werken in verband met het beschermen van kusten en oevers en van de bodem tegen erosie door stroom, golven en schepen, en voor het beschermen van schepen tegen golfslag in havens, het bestrijden van hoog water op rivieren en beken, in boezems en meren en van stormvloed langs de kust, bijvoorbeeld door het aanleggen van waterkeringen.

Multifunctionele waterbeheersing

Hieronder verstaat men werken, die voorzien in gecombineerde behoeften zoals hierboven omschreven, waarvoor een oplossing wordt gezocht in een totaal ontwerp. Zo wordt met de realisering van het Deltaplan een antwoord gegeven op een aantal van de hiervoor gesignaleerde behoeften.

Landaanwinning

Landaanwinning kan verkregen worden door aanleggen van dijken en/of opslibben en/of opspuiten en kan dienen ten behoeve van landbouw, wonen, industrie, opslag of verkeer en voor het bergen van grond, bijvoorbeeld baggerspecie.

Oeververbindingen

Oeververbindingen worden over, op en onder wateren aangelegd, daar waar deze worden gekruist door andere wateren, door landverkeer en door leidingen.

Installaties en transportsystemen voor olie- en gaswinning op zee

Hiertoe behoren werken voor het exploreren, exploiteren en transporteren, van grondstoffen uit zeeën of meren (offshore techniek). Het civieltechnische gedeelte omvat onder meer de vaste constructies (jackets, gravity structures, eilanden, etc.) en de leidingen.

Installaties en transportsystemen voor opwekking van windenergie op zee

Hiertoe behoren werken voor het opwekken en transporteren van windenergie. Dat zijn windmolens (funderingsconstructie met evt. ontgrondingsbescherming, mast en turbine) met bijbehorende transportleidingen.

Winning van zand, grind en klei op land en in water

Zand en grind worden gewonnen uit rivieren en uit zee, soms ook op het land, evenals klei.

Beschermen en beheren van water in kwalitatieve zin

Het kan nodig zijn, zout en zoet water te scheiden of vervuild grondwater af te schermen of oevers en stranden geschikt te maken voor recreatie.

Waterbouwkunde beperkt zich dus niet tot het vastleggen van de begrenzingen van beken, rivieren, meren en zeeën, het graven van (scheepvaart)kanalen en afwateringen en het leggen van bruggen.

1.3 Waterbouwkunde en Civiele Techniek

De waterbouwkunde neemt binnen de civiele techniek een geheel eigen plaats in. Het is goed om na te gaan waar de overeenkomsten liggen en waar de verschillen.

Overeenkomsten met de andere onderdelen van de civiele techniek hebben meestal betrekking op het gebruik van dezelfde basiswetenschappen (denk aan sterkteleer) en dezelfde constructiematerialen. In het algemeen beweegt de waterbouwkunde zich op het grensvlak van die basiswetenschappen (vloeistofmechanica/geotechniek, vloeistofmechanica/sterkteleer, etc.).

Een belangrijk verschil met andere sectoren van de civiele techniek is het éénmalige karakter van veel waterbouwkundige werken. Werken die een heel specifiek doel hebben, toegesneden op heel specifieke plaatselijke omstandigheden. Daarom komt in de waterbouwkunde weinig repetitie voor en is elk nieuw ontwerp of werk een op zichzelf staand vraagstuk. Dit heeft gevolgen zowel voor ontwerp als voor uitvoering en beheer van waterbouwkundige werken.

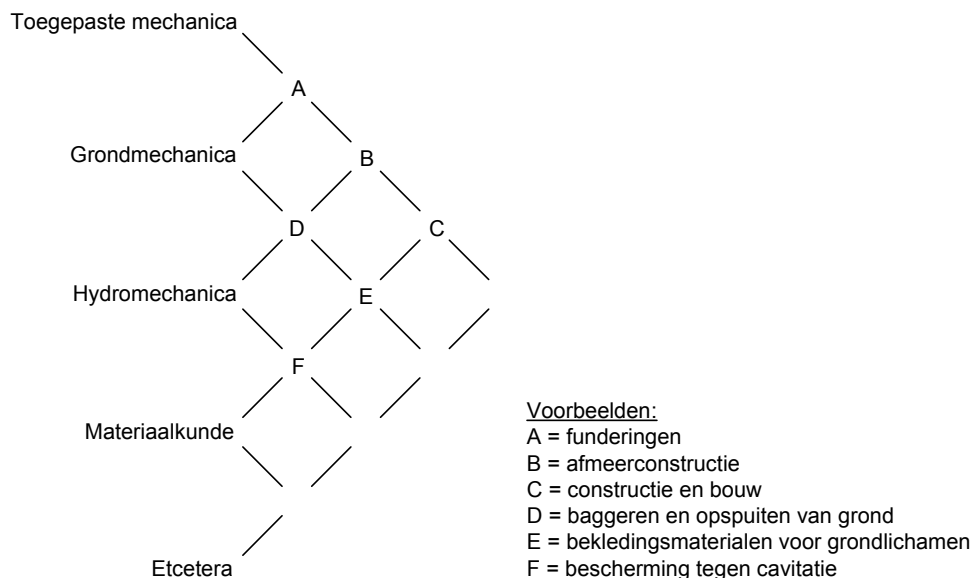
Het ontwerp zal zich minder vaak voltrekken langs vaste regels van voorschriften en procedures. De ontwerper zal zelf inzicht moeten verwerven (en dat inzicht toepassen) in belastingen, risico's en veiligheid. Daarbij moet worden bedacht dat de hydrodynamische belastingen zelf vaak weer worden beïnvloed door de vormgeving van de constructie.

Hetzelfde geldt voor de uitvoering van de werken. Ook hier is zelden sprake van repetitie en moet de uitvoeringsmethode altijd weer worden aangepast aan de lokale situatie. Daardoor is het ook vaak onmogelijk om standaard materieel te gebruiken. Gelukkig is de omvang van de projecten vaak zo groot dat het de moeite loont speciaal materieel te ontwikkelen. Dit vormt weer een aparte uitdaging voor de waterbouwer.

Voorbeelden van dergelijk speciaal materieel zijn de werkschepen die werden gebruikt bij de bouw van de havenmond in Hoek van Holland, de hefeilanden die werden gebruikt bij de bouw van de golfbrekers in IJmuiden en het vele materieel dat speciaal werd gebouwd voor de Oosterscheldekering.

1.4 Relatie met andere vakgebieden

Reeds eerder werd aangestipt dat de waterbouwkunde zich beweegt op het grensvlak van een aantal basiswetenschappen, zoals toegepaste mechanica, vloeistofmechanica, grondmechanica, materialenkennis (beton, hout, staal, kunststoffen, asfalt), enz. De waterbouwkundige zal een grondige kennis van de basiswetenschappen moeten hebben om als gesprekspartner van de diverse specialisten het project zelf te blijven overzien. Figuur 1-1 geeft een nadere toelichting van het synthetisch karakter van de waterbouwkunde.



Figuur 1-1: Waterbouwkunde als synthetisch vakgebied

Verder hebben waterbouwkundige werken vaak een grote omvang en grijpen zij diep in de fysische en sociale omgeving waarin wij leven.

Daarom is het onmogelijk een waterbouwkundig werk te ontwerpen zonder een diepgaand onderzoek naar de ecologische en milieutechnische gevolgen ervan. Daarmee wordt niet bedoeld dat er geen wijziging in het milieu mag worden aangebracht. Veel van wat wij thans ervaren als waardevolle elementen in het landschap is (gewild of ongewild) het resultaat van waterbouwkundig ingrijpen.

Hetzelfde geldt voor de sociale en culturele gevolgen van waterbouwkundige werken. Ook hier is de invloed vaak zeer groot. Denk hierbij aan de invloed van een irrigatieproject op het maatschappelijk leven in een ontwikkelingsland, aan de ontsluiting van Zeeland na de uitvoering van het Deltaplan, of aan de redding van de tempels van Aboe Simbel na de bouw van de Assoean dam in de Nijl.

Naast deze moeilijk te kwantificeren overwegingen speelt natuurlijk ook de economie een grote rol. Uiteindelijk zal voor elk groot project moeten worden nagegaan of de verhouding tussen kosten en baten positief uitvalt.

De relatie met de niet-technische wetenschappen duidt al aan dat de uiteindelijke beslissingen over grote civieltechnische werken nooit worden genomen op grond van technische overwegingen alleen. Bij de eindbeslissing zullen voor- en nadelen op een zeer breed gebied moeten worden afgewogen. Voor de waterbouwkundig ontwerper betekent dit dat hij steeds de samenhang met het grotere geheel waarvan zijn project deel uitmaakt moet blijven overzien.

1.5 Indeling dictaat

Vanzelfsprekend kunnen in dit college niet alle onderdelen van het vakgebied aan de orde komen. Het vakgebied van de waterbouwkunde kan op verschillende manieren worden ingedeeld. In eerste instantie zou men kunnen uitgaan van het doel van de werken:

INDELING NAAR DOEL

- Transport van water
(rivieren en kanalen, open en gesloten leidingen, stuwmeren, uitwateringssluizen)
- Transport te water
(scheepvaartkanalen, schutsluizen, steigers en kaden)
- Verdediging tegen water
(keersluizen, waterkeringen als dijken, dammen, duinen)
- Transport over en onder water
(bruggen, tunnels)

Een bezwaar van deze indeling is dat gelijksoortige constructies - zij het met een verschillend doel - telkens opnieuw aan de orde komen, met het gevaar van herhaling en mogelijk verwarring.

Een tweede indeling is mogelijk naar de aard van de waterdrager(s):

INDELING NAAR AARD

- Natuurlijke Waterlopen
(eventueel onderverdeeld in zeeën en rivieren)
- Kunstmatige Waterlopen
(eventueel onderverdeeld in open en gesloten leidingen)

Het voordeel van deze indeling is dat relatief veel aandacht kan worden besteed aan het bestaan van een natuurlijk evenwicht, en het belang daarvan. Dit natuurlijk evenwicht is vaak aanwezig in rivieren en langs de kust. Een bezwaar van deze onderverdeling is het feit dat de kunstmatige waterlopen een vergaarbak worden van menselijk ingrijpen, zonder dat daarin een grote lijn te herkennen is.

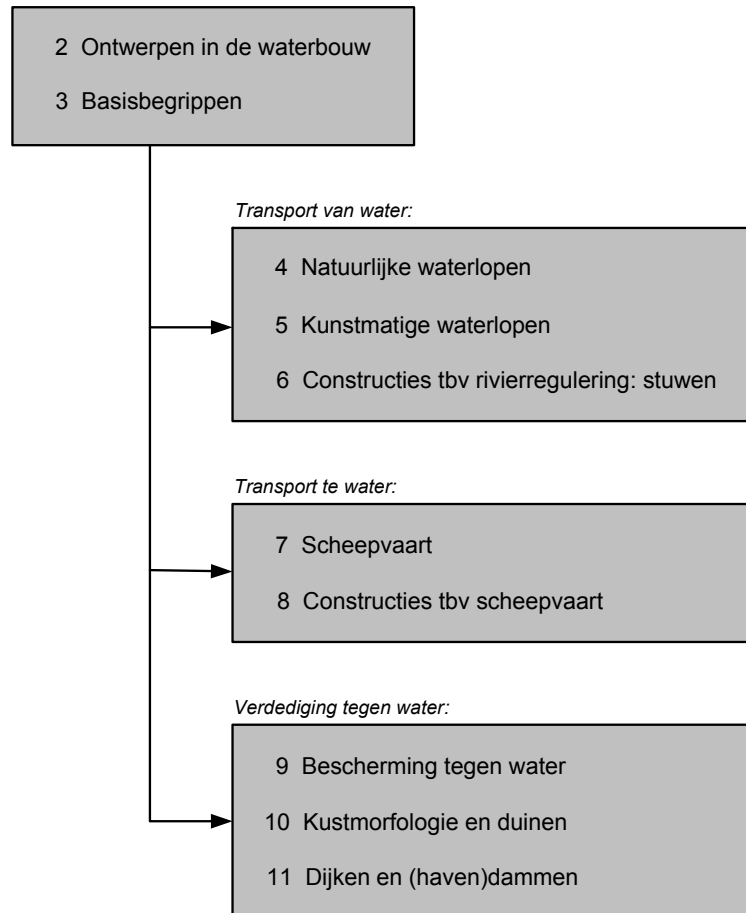
Een derde indeling is mogelijk naar de aard van de gebruikte bouwmaterialen en het type constructie:

INDELING NAAR CONSTRUCTIE

- Harde Constructies
(opgebouwd uit bijvoorbeeld staal en beton)
- Flexibele Constructies
(bijvoorbeeld opgebouwd uit loskorrelige materialen zoals stortsteen)
- Bouwen met de natuur
(bijvoorbeeld door het gebruik van zand bij de versterking van de duinkust)

Deze indeling biedt de mogelijkheid om vanuit de constructieve disciplines de waterbouwkundige problemen te benaderen. Hierbij wordt dan echter vaak teveel nadruk gelegd op de constructieve aspecten en te weinig op de functionele eisen en de relatie tussen vormgeving en belasting.

Het blijkt dat geen van de indelingen geheel bevredigend is. Uiteindelijk is gekozen voor een hoofdingeling naar doel, zie Figuur 1-2, waarbij herhalingen zoveel mogelijk zullen worden vermeden. Terwille van de duidelijkheid wordt dan binnen eenzelfde hoofdstuk wel weer gebruik gemaakt van één van de andere indelingen. Transport over en onder water (bruggen, tunnels) wordt in dit colledictaat niet behandeld.



Figuur 1-2: Dictaatindeling naar doel

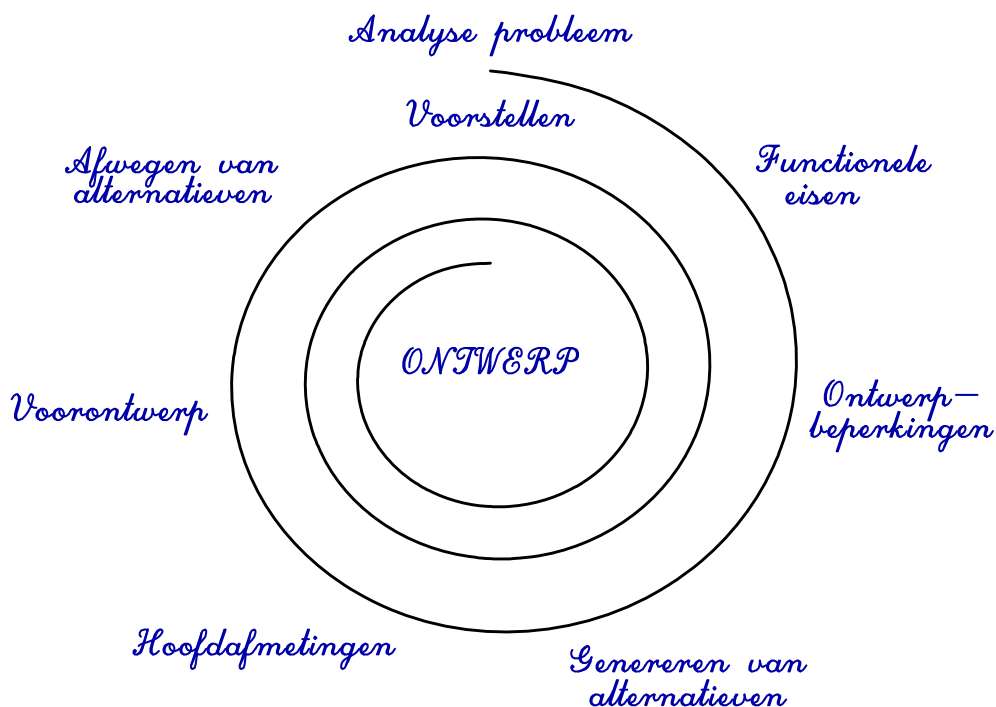
2 Ontwerpen in de waterbouw

2.1 Het ontwerpproces

De ontwerper van waterbouwkundige projecten zal de behoeften die de buitenwereld (maatschappij) stelt (bijvoorbeeld de wens tot "veilig en droog wonen beneden de zeespiegel" of "goederen transporteren van plaats A naar plaats B"), moeten analyseren, mogelijkheden moeten aandragen om aan die behoeften tegemoet te komen met inachtneming van omstandigheden (beperkingen) die worden opgelegd, en afwegingen tussen deze mogelijkheden moeten maken om tot een optimaal ontwerp te komen. Hier doet zich de tegenstrijdigheid voor dat, naarmate de kennis en de ervaring van de ontwerper toenemen, hij meer afstand tot die kennis en ervaring zal moeten nemen om niet te snel te besluiten tot reeds eerder gerealiseerde oplossingen die voor de bevrediging van de betreffende behoefte in de gegeven situatie geenszins optimaal behoeven te zijn.

De waterbouwkundige zal voor de verwezenlijking van een project een synthese tot stand moeten brengen tussen de diverse (soms tegenstrijdige) eisen die vanuit de verschillende basisdisciplines (toegepaste mechanica, grondmechanica, hydraulica, etc.) aan het totale ontwerp gesteld worden. De bedreigingen van het systeem (bijvoorbeeld de belastingen die op een constructie kunnen werken) zullen moeten worden onderkend en geanalyseerd en er zullen maatregelen getroffen moeten worden om de realisering van het ontwerp mogelijk te maken.

De diverse fasen van het ontwerpproces worden wel in een spiraal uitgebeeld. De gehele ontwerpgang wordt in de praktijk enkele malen in de spiraal doorlopen, van grof naar fijn zie Figuur 2-1.



Figuur 2-1: De ontwerpprocesgang als spiraal

In bijvoorbeeld de utiliteitsbouw en woningbouw hebben systemen vaak een repeterend karakter. Hiermee wordt bedoeld dat ze in hun geheel of dat onderdelen ervan meer dan eens gebouwd worden.

Belastingen en draagkracht van de constructies en de rekenregels ter bepaling van sterkte, stabiliteit, bruikbaarheid en duurzaamheid (en invloed op de omgeving) kunnen vastgelegd worden in voorschriften. In de waterbouwkunde zijn de systemen meestal uniek (eenmalig). Als voorbeeld van een systeem in de waterbouwkunde kan het Deltaplan genoemd worden. Voorschriften voor het ontwerpen ontbreken in de meeste gevallen. Vanuit de "basisvakken" zal de waterbouwkundige zelf tot een aanvaardbare oplossing moeten komen.

De waterbouwkundige zal kennis moeten hebben van de wijze waarop het project gerealiseerd (**uitgevoerd**) wordt. Hij zal moeten weten, op welk tijdstip, in welke volgorde en op welke plaats en wijze de bouw van zijn project gestalte krijgt en welke overwegingen daaraan ten grondslag liggen.

Nadat het ontwerp tot stand is gekomen en het project is uitgevoerd, treedt de beheersfase ervan in. Het project wordt dan gebruikt waarvoor het ontworpen is. Uiteraard zal een ontwerper kennis moeten hebben van de wijze waarop het project beheerd zal worden.

Het is mogelijk de waterbouwkunde vanuit het gezichtspunt van de ontwerper, van de constructeur, van de uitvoerder en van de beheerder te benaderen. Het is in theorie mogelijk om een tijdsvolgorde aan te geven in **ontwerpen, construeren, uitvoeren** en **beheren**. Blijkens het voorgaande is deze scheiding in het ontwerp niet te maken.

Enige aspecten van de ontwerpprocesgang zullen nu nader worden behandeld.

2.2 Vooronderzoek en Programma van Eisen

Waterbouwkundige werken worden ontworpen als antwoord op een behoefte van de buitenwereld inzake de materiële infrastructuur, voor zover deze betrekking heeft op water in enigerlei vorm.

De behoefte wordt in een **voorlopig onderzoek** geïnventariseerd. Het probleem wordt gedefinieerd en er worden **globale** mogelijkheden aangegeven om tot een oplossing te komen. De ontwerper krijgt in de eerste plaats te maken met degene die namens de toekomstige gebruikers optreedt: de opdrachtgever. Daarnaast spelen ook anderen een rol, zoals de bouwer, de toekomstige beheerder en derden als belang hebbenden (bijvoorbeeld omwonenden). De globale analyse in het voorlopig onderzoek kan een **voorlopige** situering, tracékeuze, afmetingen, tijdplanning, financiering en invloeden op andere (bestaande en toekomstige) functies in de omgeving omvatten. In de fase van het vooronderzoek worden de **behoefte** en de **mogelijkheden tot realisering** "gepeild".

In de volgende fase wordt de behoefte uitvoerig geanalyseerd en worden de functies van het te maken object vastgelegd in een **Programma van Eisen (PvE)**. De vertaling van de behoefte in een gedetailleerde lijst van **functionele eisen** dient de functies van het object **volledig** te beschrijven. Wanneer in deze fase van het ontwerpproces iets over het hoofd gezien wordt, zal dit sterk verstorend werken in de latere fasen. De lijst van functionele eisen zal vaak tot stand komen in samenspraak tussen opdrachtgever, beheerder en ontwerper.

Het is erg belangrijk om bij de beschrijving van de functionele eisen strikt gedisciplineerd in functies te denken en deze **los te zien van standaardoplossingen**. (Bijvoorbeeld: bij het omhoog en omlaag brengen van schepen bij verval dient men nog niet direct aan de standaardoplossing "**schutsluis**" te denken.) Het denken in abstracte begrippen vraagt een grondige bezinning op het "waarom" en "wat doet het". Een hulp bij het systematisch denken kan zijn: een functie te beschrijven in een zelfstandig naamwoord en een werkwoord.

Bijvoorbeeld: In plaats van "Stormvloedkering": **water tegenhouden** (bij hoge zeestanden) en **water doorlaten** (als de zeestand niet hoog is); in plaats van brug, tunnel, pont: **water kruisen** (van landverkeer).

De behoefte kan in de tijd veranderen. Bij het ontwerpen dient overwogen te worden, dat achteraf, indien nodig, veranderingen of toevoegingen in de functie moeten kunnen worden gerealiseerd. Zo krijgt een brug later wel een andere rijstrookindeling of men wil een rijstrook toevoegen (Van Brienenoordbrug). De fundering dient hierop dan berekend te zijn. Of men wil, vanwege een toename van de hoogte van schepen boven de waterlijn, een brug opvijzelen. Een tunnel later verbreden of dieper leggen is niet mogelijk.

De **uitvoering** vormt een geheel andere **levensfase** van het project dan de **gebruiksfase** en daarvoor kunnen andere eisen gelden, zowel voor het geheel als voor de onderdelen. Te denken valt hierbij aan de transportfase van geprefabriceerde delen voor een af te zinken tunnel of aan een dijk waarvan de bekleding nog niet is aangebracht tijdens golfaanval of waterstandsverhoging.

Meestal worden eisen gesteld aan de vervanging van onderdelen van een systeem of van een hele constructie met het oog op het onderhoud en/of het herstel. Daartoe moet het onderdeel van het systeem of van de constructie bereikbaar zijn voor de mensen, het materieel en het materiaal, die daarvoor nodig zijn. De toekomstige beheerder dient de eisen die beheer, onderhoud en herstel na schade stellen, te formuleren.

Soms zal ook de afbraak van het object in het Programma van Eisen betrokken moeten worden.

2.3 Randvoorwaarden

Nadat het programma van eisen is vastgesteld, komen de **randvoorwaarden**, waarbinnen het project moet worden gerealiseerd, aan de orde. Dit zijn de **omstandigheden die de natuur** en de **bependingen die de omgeving** (maatschappij) **opleggen**.

Ook hier geldt (evenals bij de vaststelling van de behoefte), dat rekening moet worden gehouden met mogelijke veranderingen in de tijd: een rivier of getijarm waarvan de geul zich verplaatst en/of verdiept, beïnvloedt het ontwerp van de fundering van een brug of van de bekleding van de teen van een dijk.

De randvoorwaarden betreffen:

- **de topografische situatie** waarin het project moet worden gerealiseerd: de terreingesteldheid met bijvoorbeeld hoogteligging, hellingen, bebouwing en bestaande infrastructuur. Bij werken in zee zijn dit de configuratie en de diepte van de zeebodem.
- **de grondmechanische en geohydrologische gesteldheid** zoals onder andere de grondsoort met de daarvoor kenmerkende parameters, de gelaagdheid, de bodemdaling en zeespiegelrijzing, etc..
- **hydraulische, hydrologische en oceanografische randvoorwaarden** die betrekking hebben op waterstanden, verhang, ligging van het freatisch vlak, verval, astronomisch getij, golfhoogten, op- en afwaaiing, etc.
- **meteorologische randvoorwaarden** die onder meer neerslag, temperatuur en wind omvatten.
- **milieubependingen** door de omgeving of de maatschappij opgelegd, bijvoorbeeld ten aanzien van overlast door luchtverontreiniging en geluid of het voorkomen van schade aan flora en fauna en aan het landschaps- of stadsbeeld.
- **ergonomische en zintuig-fysiologische randvoorwaarden** die een rol spelen bij bediening en beheer. Bijvoorbeeld bij de plaatsing van bedieningspanelen en monitoren bij de centraal door één man bediende sluis.
NB: Soms blijkt later de ontwerpgedachte doorkruist te worden door mensen die met het project moeten werken. Een man, die een volle dagtaak geïsoleerd in een bedieningsruimte moet doorbrengen, vraagt al snel naar een tweede man, omdat men zo weinig contact met anderen slecht verdraagt.
- **financiële bependingen**, die tenslotte bij elk project een rol spelen. In het algemeen zal in de fase van het vooronderzoek reeds een kosten-baten analyse worden uitgevoerd. Daarbij moeten globaal de bouw- en exploitatiekosten van het uit te voeren werk bekend zijn. De eis is een optimaal ontwerp tegen zo laag mogelijke kosten, waarbij **alle** kosten van het **totale project** moeten worden beschouwd. Waterbouwkundige werken worden vaak bekostigd uit de openbare financiën, waardoor van te voren krediet door het openbaar bestuur moet zijn goedgekeurd. Dit krediet is gebaseerd op de kosten en baten van het project, die zijn geraamd aan de hand van een voorontwerp. Het definitieve ontwerp wordt later gedetailleerd begroot.

- **veiligheid**, zie hierna.

Een belangrijke randvoorwaarde die door de maatschappij (samenleving) aan waterbouwkundige werken wordt opgelegd, is de eis van voldoende **veiligheid**.

(Neem als voorbeeld weer het Deltaplan!) "Veiligheid" kan worden omschreven als het uitgesloten zijn van gevaar. Onder "gevaar" wordt verstaan: de mogelijkheid dat uit gegeven omstandigheden onheil, ongeluk of nadeel kan resulteren. De toevoeging **kan** duidt er op dat hier een zeker kansbegrip aanwezig is. Onheil, ongeluk of nadeel **kunnen** optreden maar **hoeven dat niet noodzakelijkerwijs**. Veiligheidsfilosofie is een onderwerp dat in het college CT4130 Probabilistic design uitgebreider dan hier aan de orde komt.

Volgens bovenstaande definities is absoluut veilig bouwen onmogelijk. Van ingenieurs wordt gevraagd systemen te ontwerpen die bepaalde functies kunnen vervullen en wel **met een voldoende mate van veiligheid**. Hiertoe is het nodig een uitspraak te doen omtrent de mate waarin gevaar voor de vervulling van die functie(s) (**bedrijfszekerheid**) acceptabel is gezien **de offers** (kosten) die nodig zijn om die mate van veiligheid te realiseren.

Onderscheid kan worden gemaakt tussen uitspraken over de kwantitatieve en de kwalitatieve beoordeling van de veiligheid. Een dergelijke indeling komt in grote trekken overeen met de objectieve en de subjectieve **beleving** van veiligheid. Voor zover materiële zaken (**ponderabilia**) door gevaar bedreigd worden, kan de mogelijkheid (**kans**) dat nadeel (**schade**) ontstaat vaak verminderd worden door extra **kosten** aan het project te besteden. De financiële middelen zijn echter niet onbeperkt, zodat antwoord zal moeten worden gegeven op de vraag: **Veiligheid tot welke prijs?**, waarbij de prijs veelal de mate van veiligheid bepaalt.

Voor een objectieve afweging kan in dit geval worden aangesloten bij in de schadeverzekeringswereld gangbare begrippen. Een schadeverzekeringsmaatschappij zal een hogere premie vragen naarmate de kosten van (en/of als gevolg van) schade aan (of veroorzaakt door) het te verzekeren object hoger zijn. Eveneens zal een hogere premie worden gevraagd als de kans dat schade ontstaat, groter is.

Men hanteert het begrip **risico** als het produkt van kans en gevolg:

$$Risk = P_f * W \quad (2.1)$$

waarin:

Risk = (Engels voor) risico

P_f = kans (op falen van de constructie, waardoor schade optreedt. De afkorting P voor "kans" is afkomstig van het Engelse "Probability".)

W = schadekosten

Hieruit blijkt, dat de begrippen "gevaar" (als tegenstelling tot "veilig") en "risico" nauw verwant zijn. Het begrip **risico** impliceert hier echter **kwantificering (in geld of anderszins) van het nadeel** (schade) en beperkt zich dus tot die aspecten van het "gevaar" die **kwantificeerbaar** zijn.

Ook niet-materiële zaken worden bij en na realisering van werken door gevaar bedreigd. Te denken valt aan:

- het verlies van mensenlevens, het optreden van ziekten en/of invaliditeit.
- het verloren gaan van historische en culturele waarden en van onvervangbare gegevens.
- schade aan het milieu.
- het onbehagen in de samenleving als gevolg van een ramp.
- etc.

Hoewel soms kwantificeerbaar (bijvoorbeeld het **aantal** doden) is het risico, zoals hiervoor geïntroduceerd, in deze gevallen niet **weegbaar**. De "schade" bestaat hier uit de kosten (in geld), nodig om een bepaalde mate van veiligheid te realiseren en niet in geld uit te drukken zaken, die **imponderabilia** worden genoemd. De acceptabele kans op het verloren gaan van imponderabilia zal in een (al dan niet brede) maatschappelijke discussie moeten worden vastgesteld. Een aanzet tot deze discussie is gegeven in *Enkele gedachten aangaande een aanvaardbaar risico in Nederland* door Vrijling (1985).

De uiteindelijk gehanteerde kans (op schade) wordt of gevonden uit een economische optimalisatie of opgelegd door een (meestal politieke) beslissing op grond van imponderabilia. Hierbij zal de kleinste berekende kans als toelaatbare kans dienen te worden gehanteerd.

2.4 Basisideeën en alternatieven

Bij het ontwerpen worden **oplossingen** bedacht die passen **binnen het raam van de functionele eisen en de randvoorwaarden**. Om in een vroeg stadium te voorkomen, dat potentieel goede ideeën niet onderkend worden, moet bij het vinden ervan zoveel mogelijk systematisch te werk worden gegaan. Een alternatief is een uitwerking van een idee in een (voor)ontwerp van een systeem of in een maatregel.

Bij het ontwikkelen van basisideeën worden beslissingen genomen, waarbij behoeften zoals geformuleerd in de functionele eisen en "onmogelijkheden" die voortvloeien uit de randvoorwaarden, tegen elkaar worden afgewogen.

Men maakt wel onderscheid tussen twee wijzen van benadering:

- Vanuit de behoefte wordt eerst gezocht naar de "ideale" oplossing. Daarna worden de randvoorwaarden in de beschouwing betrokken en door het doen van concessies wordt een compromis-oplossing bereikt. Creativiteit en fantasie krijgen in deze benadering ruim spel en de mogelijkheid bestaat, dat geheel nieuwe oplossingen worden gevonden.
- Vanuit de behoefte wordt onder gelijktijdige inachtneming van de randvoorwaarden gezocht naar de optimale oplossing. Hierbij wordt op een min of meer natuurlijke manier aangesloten bij de volledige kennis die de ontwerper inmiddels van het project heeft verworven.
- Bij toepassing van deze methode bestaat de kans, dat ten onrechte tot een "traditionele" oplossing wordt besloten.

Bij het toetsen van de basisideeën zal een groot aantal principe-oplossingen afvallen, omdat de toets bij het afwegen niet wordt doorstaan. Wat dan blijft zijn de mogelijke alternatieven. Deze kunnen als voorontwerp of maatregel nader worden uitgewerkt.

Het **definitieve ontwerp** wordt gekozen uit de voorontwerpen die tenslotte overblijven. Voor dit definitieve ontwerp wordt een zogenaamd **technisch programma van eisen** opgesteld, waarin vormgeving, toe te passen materialen en methoden tot realisering zijn vastgelegd.

Bij het **ontwikkelen van oplossingsprincipes** (die, geconcretiseerd, de alternatieven voor het ontwerp opleveren) is het van groot belang de voornaamste behoefte(n) **kernachtig te omschrijven**. Omdat hier vooral gekeken wordt naar de functies, zal in het vervolg worden gesproken van de **Primaire Functionele Behoeft (PFB)**, dat is die behoefte die in ieder geval moet worden vervuld, wil men de bevrediging van alle andere behoeften niet overbodig maken. Er moet worden gezocht naar mogelijkheden om aan de PFB te voldoen.

Afgezien van de geniale inval (EUREKA) zijn een groot aantal methoden bekend om oplossingsprincipes te ontwikkelen. Daarvan zullen een drietal, die in de waterbouwkunde toepassing gevonden hebben, kort worden besproken, te weten:

- de "traditionele" ontwerpmethode
- de "ontwerpboom"
- de "morfologische methode"

De "traditionele" ontwerpmethode

Er zullen voor een gegeven behoefte altijd wel voorbeelden van oplossingen voor min of meer gelijksoortige problemen bestaan. Men kan deze bestaande oplossingen analyseren en nagaan, in hoeverre zij voldoen aan de gegeven behoeften van het onderhavige probleem. Men komt dan tot wat men een **aangepast ontwerp** zou kunnen noemen. Daarin zijn de bruikbare van bestaande oplossingen verwerkt. Bij deze wijze van werken wordt van een uitgebreide kennis en vooral van ervaring bij de ontwerper uitgegaan.

De "ontwerpboom"

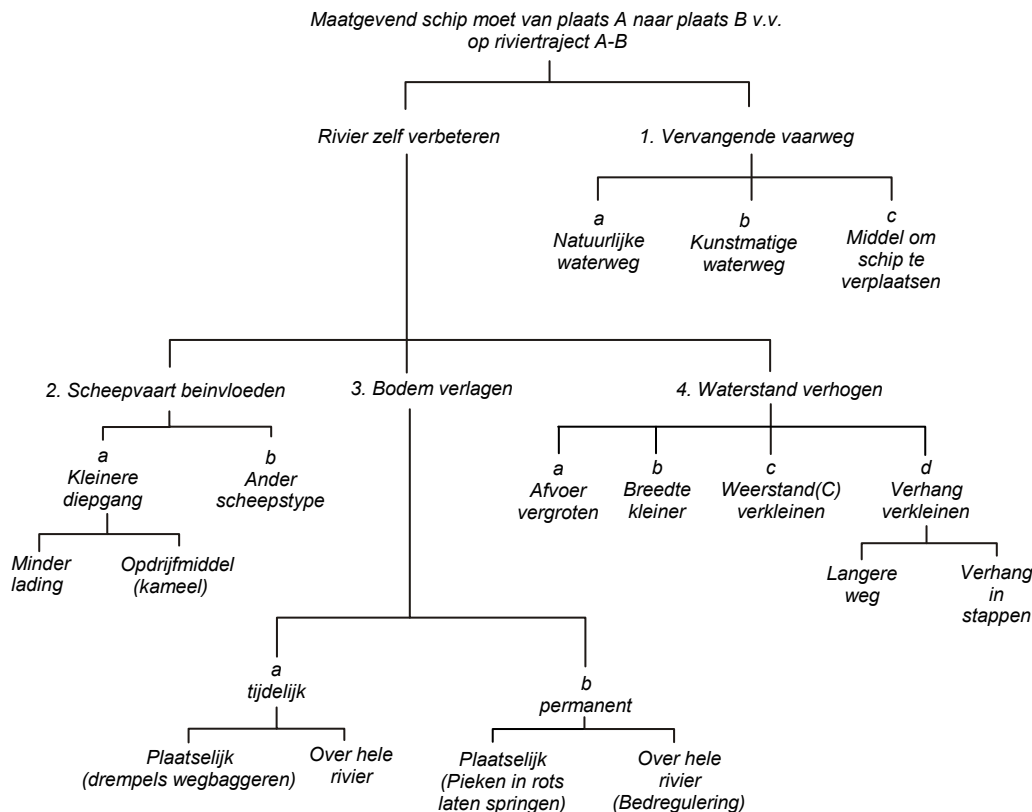
Op grafische wijze wordt duidelijk en systematisch een overzicht gegeven van de mogelijke oplossingsprincipes. In Figuur 2-2 is een voorbeeld gegeven van een dergelijke ontwerpboom. Als

probleem is de slechte bevaarbaarheid van een riviertraject A - B genomen. De PFB is (voor de eenvoud van het voorbeeld) beperkt door te stellen, dat een bepaald type schip met een bepaalde diepgang het traject moet kunnen afleggen. (Hiermee wordt afgezien van oplossingen die uitgaan van alternatieve vervoermiddelen.)

Opmerkingen:

- Een ontwerpboom geeft niet *de* oplossing van het probleem, maar een aantal *oplossingsprincipes*, waaruit een *keuze* zal moeten worden gemaakt. Deze keuzen zullen geconcretiseerd moeten worden in alternatieven voor het ontwerp.
- De gepresenteerde ontwerpboom is een van de mogelijke overzichten van oplossingsprincipes, zeker niet *de* ontwerpboom voor het gestelde probleem.

Primaire Functionele Behoefte (P.F.B)



Figuur 2-2: Voorbeeld ontwerpboom: probleem slechte bevaarbaarheid riviertraject A - B

De “morfologische methode”

Bij deze methode wordt een min of meer complex probleem gesplitst in verschillende functies, onderdelen of aspecten, zie Figuur 2-3. Dit is een goede werkwijze als er meerdere gelijkwaardige functionele behoeften bestaan. Voor de onderdelen afzonderlijk worden een aantal sub-oplossingen ontwikkeld. Deze worden in een matrix (morfologische kaart) bij elkaar gebracht. Door de sub-oplossingen te combineren, vindt men mogelijke oplossingen voor het totale probleem.

Bij het samenstellen van de verschillende sub-oplossingen moet men wel bedenken, dat niet alle combinaties zinvolle totaaloplossingen geven. Soms kunnen verschillende oplossingsaspecten met elkaar in tegenspraak zijn.

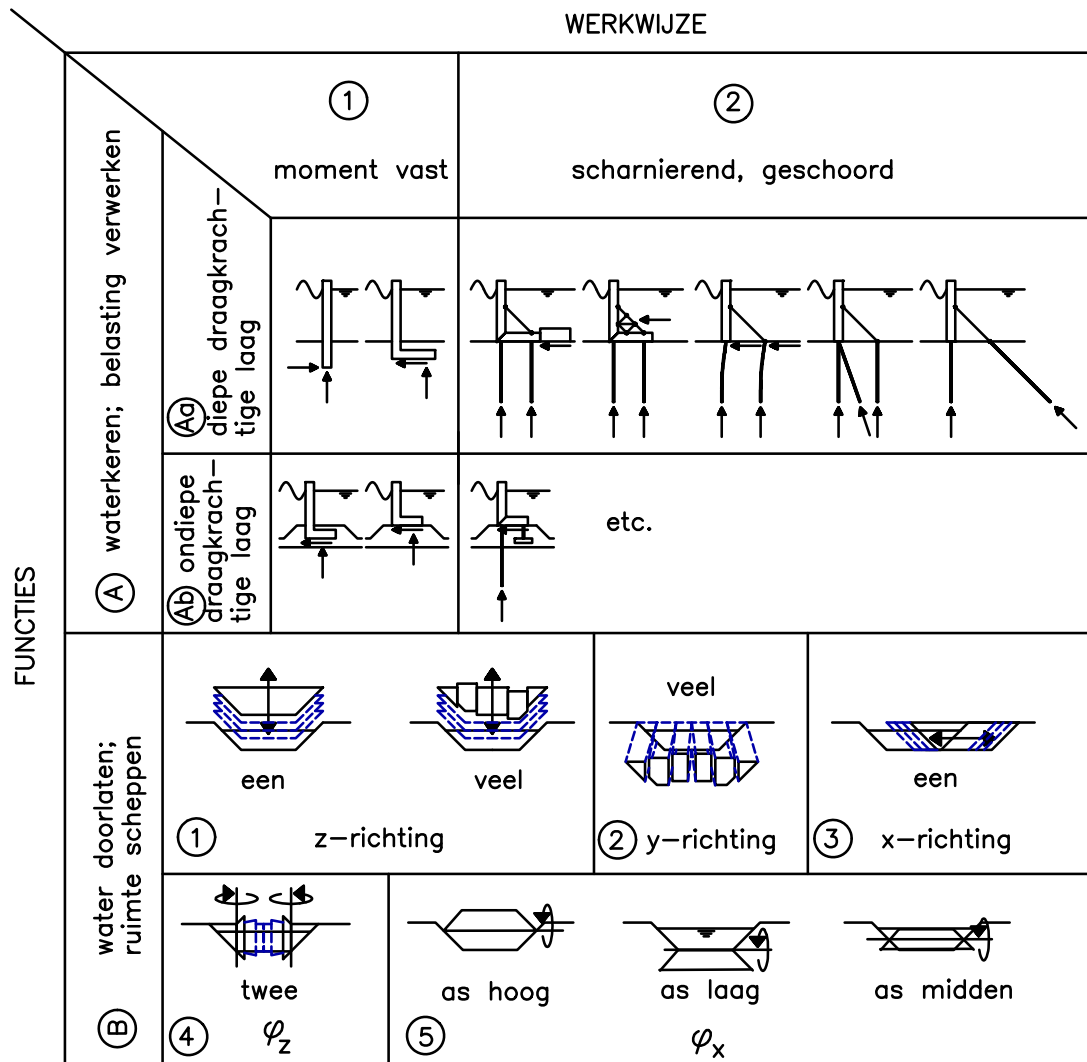
Een voorbeeld van een morfologische kaart is gegeven in Figuur 2-4. Daarin worden mogelijke oplossingsaspecten voor de Stormvloedkering Oosterschelde aangegeven. De Stormvloedkering heeft twee primaire functies:

- **water keren** bij hoge waterstanden op zee.
- **water doorlaten** onder normale omstandigheden.

Voor beide functies is een aantal oplossingsprincipes aangegeven.

Aspecten Functies Eigenschappen	Sub-oplossingen (middelen)		
	1	2	etc.
A	De oplossingsprincipes voor het totale probleem worden gevonden door combinaties van suboplossingen (bijvoorbeeld door A1, B3 en D5 te combineren).		
B			
C			
etc.			

Figuur 2-3: Schema morfologische kaart



Figuur 2-4: Morfologische kaart voor de functies "water keren bij hoge waterstanden op zee" en "water doorlaten onder bij normale omstandigheden"

"water

2.5 Afwegen van alternatieven

Bij het toetsen van de basis-ideeën zal een groot aantal principe-oplossingen afvallen, omdat de toets bij het afwegen niet wordt doorstaan. Getoetst wordt aan de mate van vervulling van de in het vooronderzoek geformuleerde eisen (aan de primaire functionele behoefte wordt door **alle** alternatieven voldaan!) en aan de randvoorwaarden (de mate waarin het alternatief binnen de randvoorwaarden blijft of daaraan voldoet). Men zal een "maat" voor vervulling en voldoening moeten hebben, m.a.w. voor de **afweging** van de verschillende gevonden alternatieven zal men moeten beschikken over **beoordelingscriteria**.

Een eerlijke afweging van de gevonden alternatieven zal alleen kunnen plaatsvinden als alle oplossingsprincipes volledig zijn uitgewerkt. Dit is niet erg doenlijk. Men zal moeten selecteren om althans tot een voorlopige keuze te komen.

Naarmate men verder in het ontwerpproces (in volgende "windingen" van de spiraal van Figuur 2-1) vordert, zullen meer rekenwerk vragende beoordelingscriteria in beschouwing worden genomen. Er zullen steeds meer alternatieven afvallen, terwijl de kennis omtrent de alternatieven die overblijven steeds groter wordt. Tenslotte moet een keuze gemaakt worden uit de weinige voorontwerpen die overblijven.

Voor een **eerste selectie van alternatieven** is men aangewezen op grof selecterende criteria. Het aantal alternatieven is in dit stadium nog groot. Te denken valt aan:

Elimineren of combineren van alternatieven. Het beste criterium daarvoor is, te kijken naar de **technische of fysieke wenselijkheid** van het voorgestelde alternatief. (NB: Merk op, dat technische **uitvoerbaarheid** geen goed criterium is. Mits van voldoende financiële middelen voorzien, is praktisch elk alternatief "theoretisch" -technisch- uitvoerbaar.) In het voorbeeld van Figuur 2-2 kan men denken aan tak 2.a: Scheepvaart beïnvloeden door diepgang te verkleinen. Als de diepgang van een leeg schip (schip in ballast) groter is dan de beschikbare vaardiepte, dan behoeft naar een oplossing uit deze hoek niet verder te worden gekeken.

Inpasbaarheid in de infrastructuur of inpasbaarheid in het milieu.

Als in het voorbeeld van Figuur 2-2 de kunstmatige vervangende vaarweg (tak 1.b.) een bebouwd gebied of een beschermd natuurgebied doorsnijdt, kan dat een overweging zijn dit alternatief niet in beschouwing te nemen.

Men kan de factor **tijd** in de beoordeling betrekken, zowel de **tijd die men aan de ontwikkeling van een alternatief kan of wil besteden** als **de tijd die uitvoering van een bepaalde oplossing zal gaan kosten**.

Meestal blijven na deze afwegingen in een vroeg stadium van het ontwerp nog te veel oplossingsprincipes over. Er zijn talrijke criteria die kunnen worden toegepast om tot een selectie te komen, maar uiteindelijk komt een selectie in een vroeg stadium van het ontwerp vaak tot stand op grond van een schatting van **de kosten van het ontworpen object**. Door het maken van schetsplannen kan men proberen na te gaan, welke **kostensoorten** een belangrijke rol zullen spelen.

De volgende kostensoorten kunnen worden onderscheiden:

Bouwkosten

Deze kunnen worden onderscheiden in:

1. vaste kosten

De vaste kosten zijn die kosten die gemaakt moeten worden voor het ter plaatse brengen van arbeidskrachten, materiaal en materieel. Voordat men bijvoorbeeld met het opspuiten van een dijklichaam kan beginnen, zal eerst een zandzuiger ter plaatse moeten zijn. Voordat een m³ zand in het werk is gebracht, zijn er voor dat doel al aanzienlijke kosten gemaakt.

Tot de bouwkosten behoren ook de onteigeningskosten en de schadeclaims van derden, zoals bijvoorbeeld verdroging van landbouwgewassen als gevolg van bemaling.

2. variabele kosten

Deze kunnen globaal worden geschat uit de ervaring met overeenkomstige werken (kosten per m¹ dijk, kanaal of kunstwerk als kademuur, 4-strooks tunnel etc.).