
Nieuw dwarsprofiel voor het Amsterdam-Rijnkanaal

Afstudeerverslag

L. Lievense
2009/2010



Nieuw dwarsprofiel voor het Amsterdam-Rijnkanaal

Afstudeerverslag



Afstudeerinstelling:

Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur
Griffioenlaan 2
3526 LA Utrecht
Tel. 088-7972111



Deltares
Rotterdamseweg 185
2629 HD Delft
Tel. 088-335873



Onderwijsinstelling:

TU-Delft
Faculteit Civiele Techniek
Sectie Waterbouwkunde
Stevinweg 1
2628 CN Delft
Tel. 015-2785440

Afstudeerder:

L. Lievense
Blauwe Distelstraat 3
3252 LA Goedereede-Havenhoofd
Tel. 0187785047

Samenvatting

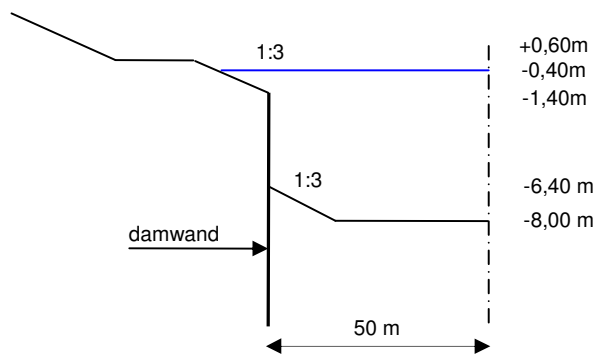
In dit afstudeerrapport is de vraag gesteld om in het Amsterdam-Rijnkanaal een dwarsprofiel te ontwerpen dat ervoor zorgt dat het kanaal goed bevaarbaar is en waarbij de stabiliteit van de oevers wordt gewaarborgd. Tevens wordt rekening gehouden met diverse maatschappelijke aspecten. De opdracht is als volgt samengevat: Het ontwikkelen van een dwarsprofiel met stabiele oevers waarbij rekening gehouden wordt met toekomstige ontwikkelingen, duurzaamheid en recreatie.

Uit de geschiedenis van het Amsterdam-Rijnkanaal valt op dat de diepgang vergroot is van 3,30 meter naar 4,00 meter, deze diepgang is vanaf 1988 toegelaten en berekend op de afmetingen van de vierbaksduwvaart. Eind van de jaren '90 van de vorige eeuw verschenen de eerste grotere binnenvaartschepen op de binnenvaart kanalen. Rond het jaar 2002 is voor het eerst geconstateerd dat er ontgrondingen plaatsvonden die problemen gaven voor de oeverconstructie, mogelijk als gevolg van de grotere binnenvaartschepen. Het aantal grotere schepen vooral in de klasse Vla is de laatste jaren sterk gegroeid, het motorvermogen en laadvermogen neemt nog steeds verder toe (schaalvergroting). Uit onderzoek blijkt dat instabiliteit van de damwandoever, ten gevolge van erosie, voorkomt in de volgende situaties:

- Locaties met onvoldoende nat profiel $< 600 \text{ m}^2$ (voldoen niet aan de wens van Rijkswaterstaat);
- Locaties waar veel gemanoeuvreed wordt door schepen;
- Vaarwegen waar het gemiddeld laadvermogen van de vloot en het motorvermogen de afgelopen tien jaar sterk is toegenomen;
- Rechte kanaalgedeeltes.

Het laatste punt (recht kanaalgedeelte) is in dit afstudeeronderzoek onderzocht. Ten noorden van Breukelen is een representatief kanaalgedeelte op het Amsterdam-Rijnkanaal als onderzoekslocatie gekozen. Op de onderzoekslocatie is tussen de 0,20 en 1,70 meter erosie geconstateerd binnen 15 meter van de damwand. De mogelijke oorzaak van deze erosie wordt in dit verslag verder onderzocht. Er is onderzoek gedaan naar de maatgevende hydraulische belasting, deze wordt gegenereerd door de maatgevende scheepscombinatie van twee oplopende schepen. Een Rijnmaxschip (135x17x4,00m) loopt een vierbaksduwstel (200x22,8x4,00m) op. In deze situatie is de retourstroom maatgevend ten opzichte van de hoofdschroef en de boegschroef. Met het 1D programma DIPRO is de retourstroom bepaald. Met het 2D model in Delft3D wordt gedetailleerder de maximaal optredende retourstroom rondom twee maatgevende schepen bepaald, waarna een vertaling naar de bodem is gemaakt door een berekening van de erosie te maken. Hieruit volgt dat het ontworpen kanaalprofiel (2) ruim tweemaal zoveel erosie geeft dan het kanaalprofiel (3).

In dit rapport wordt kanaalprofiel (3) aanbevolen als nieuw kanaalprofiel voor het Amsterdam-Rijnkanaal. Dit kanaal bestaat uit een gebroken bakprofiel met in het midden van het kanaal een waterdiepte van 7,60 meter. De waterdiepte voor de damwand is 6,00 meter. Het natte oppervlak is 751 m^2 . De oeverconstructie bestaat uit een damwand en een taludoever.



Figuur 1: Representatief kanaalprofiel voor Amsterdam-Rijnkanaal (kanaalprofiel (3))

Het grote natte oppervlak verbetert de bevaarbaarheid van het kanaal. Door het combineren van een damwand met een taludoever kunnen de ruimtebesparende eigenschappen van de damwand benut worden samen met de voordelen van een talud.

Een taludoever met een helling van 1:3 kan voor verschillende toepassingen gebruikt worden o.a:

- Uitdemping van golven, waardoor het kanaal beter bevaarbaar wordt voor de kleinere beroepsvaart en de recreatievaart;
- Aanleg van natuurvriendelijke oevers. Wat een doelstelling is van Rijkswaterstaat om zo groot onderhoud te combineren met de aanleg van natuurvriendelijke oevers. Deze oevers kunnen goed ingepast worden in het landschap, de harde barrière wordt opgeheven wat de uitwisseling van flora en fauna ten goede komt;
- Recreatieve invulling van de oever, de aanleg van vissteigers of 'knuppelpaden langs een natuurvriendelijke oever;
- Veilige situatie, zodat te water geraakte mensen gemakkelijk uit het kanaal kunnen komen.

Een nadeel van dit ontwerp is dat de oeverzuiging zal blijven bestaan. Verwachting is dat deze zal afnemen ten opzichte van de huidige situatie omdat het kanaalprofiel een groter nat oppervlak heeft.

Kanaalprofiel (3) is toekomstbestendig en zal door de geringe optredende erosie een stabiele oever hebben. Het is een representatief kanaalprofiel dat met weinig ruimtegebruik goed toepasbaar is op grote gedeelten van het Amsterdam-Rijnkanaal. Doordat het nieuwe kanaalprofiel goed inpasbaar is in de huidige situatie is het mogelijk om vóór 2018 30 kilometer kanaaloever te vernieuwen, dit is een eis van Rijkswaterstaat.

Ook dient rekening gehouden te worden met de functie van de waterkering en dan vooral met de Westelijke kanaaldijk (primaire waterkering). Deze kering voldoet op dit moment niet aan de gestelde eisen en dient in de toekomst aangepast te worden. In het nieuwe kanaalontwerp is de oeverconstructie stabielere waardoor de faalkans verkleind is, zodat ook de faalkans van het huidige dijklichaam verminderd wordt.

Door de matige erosie die optreedt in het kanaalprofiel (3) en de hoge score die dit kanaalprofiel krijgt in de multicriteria-tabel is het een duurzaam en robuust ontwerp. Doordat op voorhand een schatting gegeven kan worden van de mate van erosie die optreedt voor de oeverconstructie, kan de oeverconstructie hierop berekend worden, wat de kans op falen verkleint. Dit robuust ontwerp heeft dan een levensduur van 50 jaar.

Door de beperkte beschikbaarheid van verschillende gegevens, zoals vaarsnelheid van schepen op het kanaal, grondgesteldheid en peilingen van de bodem, zijn voor diverse onderdelen van dit onderzoek aannames gedaan. Bovendien zijn geen prognoses beschikbaar over de toename van de grootste schepen in de toekomst. Met deze toename wordt het aantal schepen bedoeld dat het Amsterdam-Rijnkanaal passeert. Verder zijn geen gegevens beschikbaar over het toelaten van grotere schepen dan het huidig maximale toegelaten schip (vierbaksduwstel). Het kanaal beschikbaar maken voor dergelijke schepen dient gelijktijdig op te gaan met het vergroten van de sluisafmetingen. Ook ontbreken meetseries voor hydraulische belastingen van meerdere schepen, waardoor het niet mogelijk is om een 2D of 3D model met meerdere schepen te valideren.

Het resultaat van dit afstudeerproject is een nieuw kanaalprofiel voor het Amsterdam-Rijnkanaal. Hierbij veroorzaakt de maatgevende hydraulische belasting (retourstroom) minimale erosie, zodat de oeverconstructie stabiel blijft. Verder kunnen natuur en recreatie goed samen gaan en zijn maatschappelijke ontwikkelingen meegenomen in het ontwerp.

Summary

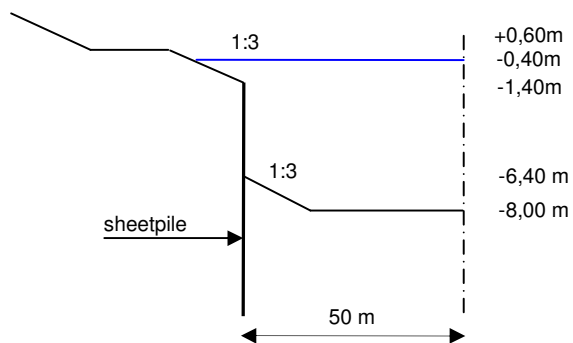
The aim of this thesis is to design a new profile for the Amsterdam-Rhine canal. The new profile needs to be well navigable and requires to have stable bank constructions. Simultaneously several social aspects have to be taken into consideration. The assignment is summarized as follows: Design a new profile of the Amsterdam-Rhine canal with a stable bank protection that takes future developments, durability and recreation into consideration.

The history of the Amsterdam-Rhine canal shows that the draft of the vessels that use this canal has increased from 3.30 to 4.00 meters. This four-metre draft has been permitted since 1988 and was based on the dimensions of the push tow units. In the late 90s of the past century, a new generation of inland vessels made its appearance. Around 2002 problems to the bank constructions due to erosion were detected for the first time, possibly caused by the new generation inland vessels. The number of bigger inland vessels, particularly those in the VIa category has strongly increased over the past years together with the engine power and cargo capacity of many vessels (increase in scale). Research shows that the instability of the bank constructions, caused by erosion, occurs in the following situations:

- Locations with an insufficient wet profile, $<600 \text{ m}^2$ (It doesn't meet the requirements of Rijkswaterstaat);
- Locations where ships have to manoeuvre considerably;
- Waterways where the average cargo load and the engine power has strongly increased over the past ten years;
- Straight canal sections.

The last situation just mentioned, that of straight canal sections is discussed in this report. A representative canal section of the Amsterdam-Rhine canal, just north of Breukelen, has been chosen as research site. At this location erosion ranges from of 0.20 to 1.70 meters within 15 meters distance of the sheet piles. The possible cause of this erosion has been further investigated in this report. Also research has been done to determine the governing hydraulic load, which is generated by governing vessels overtaking another vessel. The governing situation is defined as follows: a Rijnmaxship (135x17x4.00 m) overtaking a four barge push-towing vessel (198x22.8x4.00 m). In this situation, the return current is governing compared to a situation when loads from the main and bow thrusters are considered. In this situation, the return current is governing compared to a situation when loads from the main and bow thrusters are considered. The return current has been calculated with the 1D model DIPRO. DIPRO has also been used to validate the 2D model in Delft3D, to further elaborate the return current in the 2D model. The 2D model in Delft3D has been used to determine the maximum return currents around the two governing vessels. These values have been translated to the bottom of the canal by calculating the erosion. From these results can be concluded that canal profile (2) has twice the amount of erosion compared to canal profile (3).

In this report canal profile (3) is recommended as the new normative canal profile for the Amsterdam-Rhine canal. Canal profile (3) is combination of a box profile with a sloped upper bank and bottom, with in the middle a waterdepth of 7.60 meter. The depth in front of the sheet pile is 6.00 meters. The wet cross section is 751 m^2 . The bank construction consists of a sheet pile with a slope.



Figuur 2: Representative canal profile for Amsterdam-Rhinecanal (canal profile (3))

The larger wet cross section ensures a better navigable canal. By combining a sheet pile construction and a slope embankment the space-saving advantages of the former go hand in hand with advantages of the latter. This profile combines the space-saving advantages of a sheet pile construction together with the advantages of a sloped embankment. A sloped embankment with a steepness of 1:3 can be used for various purposes:

- Waves are damping on the slope which results in better navigability of the canal;
- In this profile bank suction will remain a problem, however it is expected to be reduced as a result of the larger wet profile;
- An objective of Rijkswaterstaat is to combine large maintenance tasks with creating environment friendly embankments. These embankments will cope well in the natural environment. The hard bank is neutralized, which improves the exchange of flora and fauna;
- The slope can be used for recreational purposes, such as the construction of 'fishing' jetties and paths along the environmental friendly embankments;
- The construction allows for extra safety, because people can easily get ashore;

This canal construction provides a good solution for future developments. The bank construction is stable because the expected erosion is not too high. The canal profile is representative for the rest of the Amsterdam-Rhine canal and can therefore be introduced on a large scale. As the new profile can easily be fitted into the current situation, it is possible to create 30 kms of new banks before 2030.

One thing that should be taken into consideration is the role of the Westelijke canal dike (primary dike). At the moment, this dike does not meet the required standards and must therefore be adapted in the future. In the new canal design, the bank construction is more stable and so the probability of failure is lower. This design has a lifespan of 50 years.

In this report, some assumptions have been made because not all the facts were known. To mention just a few: the navigation speed of the ships in the canal, the condition of the soil and the real bottom profile. There are no prognoses for the traffic intensity (for bigger ships) in the future. Neither is it known if bigger ships than the four barge push-tow will be given access to the canal in the future. However access to bigger ships cannot be granted without increasing the dimensions of the locks. Also there are no measurements of hydraulic loads for applying multiple ships, which makes it impossible to validate a 2D or 3D model for this situation.

The outcome of this thesis is a design for a new representative canal profile in the Amsterdam-Rhine canal. The normative hydraulic load (return current) causes minimum erosion to the canal bottom, which keeps the bank construction stable. Next to this the design proves that environmental and recreational purposes can be well combined and cohere with social developments.

Voorwoord

Dit rapport is het eindresultaat van mijn afstudeertraject bij de afronding van de studie Waterbouwkunde aan de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft. Het onderzoek is uitgevoerd bij Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur (DI) afdeling Waterbouw te Utrecht en bij Deltares unit Zoetwatersystemen afdeling Rivierkunde en transport over water (RIV) te Delft. In opdracht van Rijkswaterstaat DI heb ik onderzoek gedaan naar een nieuw dwarsprofiel voor het Amsterdam-Rijnkanaal.

Beide bedrijven bedank ik hartelijk voor de mogelijkheden die ze geboden hebben om mijn afstudeeropdracht uit te kunnen voeren.

Het afstuderen is voor mij een erg leerzame en boeiende periode geweest, de verdieping op het gebied van kanalen en scheepvaart was zeer interessant. Bij de start van het afstudeerwerk, leek het in eerste instantie een afgebakend onderwerp, gaande het onderzoek werd duidelijk dat het probleem complexer is dan aangenomen. Daardoor is het proces niet helemaal naar wens verlopen, sommige onderdelen hadden achteraf gezien sneller gekund. Het verder onderzoeken en combineren van gegevens zijn voor mij goede leermomenten geweest tijdens dit afstudeerproces. Over het geheel ben ik tevreden met het verloop van het afstudeerwerk en het eindresultaat wat nu voor u ligt.

De begeleiders Henk Verheij en Arjan Hijdra, die binnen de bedrijven mijn directe aanspreekpunt waren, wil ik ook hartelijk bedanken voor hun steun en kritisch commentaar die ze gegeven hebben op mijn afstudeerwerk. Henk Verheij heeft mij vooral begeleid op het rekentechnisch gedeelte van het verslag en Arjan Hijdra bij de overige zaken.

Verder wil ik de afstudeercommissie bedanken die mij tijdens de peiling advies gegeven heeft ten aanzien van de verdere ontwikkeling, opbouw en de structuur van het rapport.

De afstudeercommissie bestaat uit de volgende personen:

Ir. A.C.L. Hijdra

Dr. Ir. R.J. Labeur

Prof. Ir. H. Ligteringen

Ir. H.J. Verheij

Tot slot wil ik mijn ouders en mijn vrouw bedanken voor de steun en het kritische commentaar tijdens mijn studie en het afstuderen.

Lennert Lievense

Goedereede-Havenhoofd, mei 2010

Inhoudsopgave

Samenvatting	5
Summary	8
Inhoudsopgave	13
1 Inleiding	21
2 Achtergronden	23
2.1 Geschiedenis	23
2.2 Huidige situatie	25
2.3 Aanleiding tot onderzoek	26
2.4 Probleemstelling	26
2.5 Doelstelling/Opdrachtformulering	28
2.5.1 Programma van eisen	29
2.5.2 Afbakening	29
2.6 Methodiek	30
3 Inventarisatie relevante informatie Amsterdam-Rijnkanaal	33
3.1 Algemeen beeld Amsterdam-Rijnkanaal	33
3.1.1 Onderverdeling in het kanaal	33
3.1.2 Kanaaloever	34
3.1.3 Doorvaarthoogte en sluisen	36
3.2 Basis- en Gebruiksfuncties	38
3.2.1 Veiligheid tegen overstromen	38
3.2.2 Waterhuishouding	40
3.2.3 Recreatie	41
3.2.4 Ecologie	43
3.3 Scheepvaart	45
3.3.1 Algemeen beeld scheepvaart	45
3.3.2 Grootste toegelaten schepen op Amsterdam-Rijnkanaal	46
3.3.3 Aantal schepen door de jaren heen	46
3.3.4 Ontwikkeling in binnenvaart	48
3.3.5 Schaalvergroting scheepvaart	48
3.3.6 Spudpalen	51
3.3.7 Interactie tussen schip en water	53
3.4 De gevolgen van schaalvergroting voor het kanaalprofiel	57
4 Selectie mogelijk kanaalprofiel	59
4.1 Keuze locatie deelgebied	59
4.2 Bepalen kanaalprofiel	62
4.2.1 Oeverconstructie	62
4.2.2 Bepalen hoofdafmetingen van profiel	65
4.3 Multicriteria analyse	70
4.3.1 Criteria	71
4.3.2 Toepassing	71
4.4 Aanlegkosten nieuw profiel	74
5 Voorontwerp hydraulische belastingen	77
5.1 Ontwerpschepen	77
5.2 Situaties op Amsterdam-Rijnkanaal	78
5.3 Situatie 1	81

5.4	Situatie 2	86
5.5	Situatie 3	92
5.6	Vergelijking drie situaties	96
5.7	Vergelijkingswaarden	97
6	Maatgevende hydraulische belasting.....	99
6.1	Beschrijving modelonderzoek Delft3D	99
6.2	Invoer Delft3D	101
6.3	Valideren model	103
6.3.1	Uitvoer model huidige situatie	104
6.4	Uitvoer model nieuw kanaalprofiel met één schip.....	108
6.4.1	Kanaalprofiel (2).....	108
6.4.2	Kanaalprofiel (3).....	108
6.5	Uitvoer voor twee schepen	109
6.5.1	Situatie in kanaalprofiel 2	109
6.5.2	Kanaalprofiel (3).....	112
6.6	Voorspelling optredende erosie	115
6.7	Verdere ontwikkeling van het model.....	120
7	Inpassen en toetsen van nieuw dwarsprofiel	121
7.1	Toetsen van dwarsprofiel aan gestelde eisen	121
7.2	Inpassen nieuw kanaalprofiel	123
7.2.1	Inpassen nieuw kanaalprofiel op onderzoekslocatie	123
7.2.2	Inpassen kanaalprofiel op andere locaties.....	123
8	Conclusies.....	125
9	Aanbevelingen	127
10	Literatuurlijst	129
Bijlage 1	.....	133
Bijlage 2	.....	138
Bijlage 3	.....	141
Bijlage 4	.....	143
Bijlage 5	.....	147
Bijlage 6	.....	150
Bijlage 7	.....	152
Bijlage 8	.....	158

Lijst met figuren

Figuur 1: Representatief kanaalprofiel voor Amsterdam-Rijnkanaal (kanaalprofiel (3)).....	6
Figuur 2: Representative canal profile for Amsterdam-Rhinecanal (canal profile (3)).....	9
Figuur 1-1: Vervoersstromen in Europa.....	21
Figuur 2-1: Verschillende trajecten [Baars 1991].....	23
Figuur 2-2: Kering en sluseiland Zeeburg.....	24
Figuur 2-3: Profielschets Noordelijke pand.....	25
Figuur 2-4: Profielschets Betuwepand.....	26
Figuur 2-6: Voorover hellen damwand.....	27
Figuur 2-7: Erosie achter damwand.....	27
Figuur 2-8: Scheuren in wegdek t.g.v. verlaging bodem door erosie.....	27
Figuur 2-5: Klotsbak.....	27
Figuur 2-9: Schema aanpak onderzoek.....	31
Figuur 3-1: Normaal profiel Amsterdam-Rijnkanaal (noordelijk pand).....	34
Figuur 3-2: Locatie sluizen Amsterdam-Rijnkanaal [Baars, 1991].....	36
Figuur 3-3: Natuurvriendelijke oever t.p.v. Maurikse Wetering langs Amsterdam-Rijnkanaal.....	43
Figuur 3-4: Natuurvriendelijke oever met golfbreker. [Cur 201, 1998].....	44
Figuur 3-5: Verdeling goederenvervoer in Europa. [Waardevol transport, 2007].....	45
Figuur 3-6: Plaats binnenvaart in de transportsector.	46
Figuur 3-7: Aanvoer nieuwbouwschepen in West-Europa vanuit China.	48
Figuur 3-8: Ontwikkeling scheepvaart.*	49
Figuur 3-9: Ontwikkeling laadvermogen	50
Figuur 3-10: Spudpalen.....	52
Figuur 3-11: Waterbewegingen. [Verheij, 2008].....	53
Figuur 3-12: Scheepsgolven.....	54
Figuur 3-13: Grenssnelheid gerelateerd aan waterdiepte en blockage. [Schiereck 2001].....	56
Figuur 3-14: Scheurvorming door verzakking damwand.	58
Figuur 4-1: Zijkanaaltje (Nieuwersluis) met recreatie vaart	60
Figuur 4-2: Spoorlijn naast kanaal	60
Figuur 4-3: Recht kanaal gedeelte ten noorden van Breukelen	61
Figuur 4-4: Kanaalprofiel (1).....	68
Figuur 4-5: Kanaalprofiel (2).....	69
Figuur 4-6: Kanaalprofiel (3).....	69
Figuur 5-1: In deze figuur is duidelijk te zien dat het schip uit de as van de vaarweg vaart.....	78
Figuur 5-2: Oplopen van schepen	80
Figuur 5-3: Schroefstraalwerking [Schiereck,2006].....	82
Figuur 5-4: Schroefstraalwerking bij $f_p = 0,9$ en $h = 5,60$ meter.	84
Figuur 5-5: Schroefstraalwerking bij $f = 0,7$ en $h = 5,60$ meter.....	85
Figuur 5-6: Definities eendimensionale benadering [Schiereck, 2004].....	88
Figuur 5-7: Gebiedsgemiddelde uitvoer [Verheij, 2007]	89
Figuur 5-8 : A_s (huidige kanaal) ten opzichte van u_r , let op modus veilig, $V_s = 0,9 V_{lim}$	91
Figuur 5-9: Definities boegschroef.....	95
Figuur 5-10: Uitvoer van een 2D meting.	97
Figuur 6-2: Diepte gemiddelde snelheid, rondom Rijnmaxschip (uitvoer Delft3D).....	105
Figuur 6-3 : Waterspiegelvariatie rondom Rijnmaxschip, referentie peil -0,40 (uitvoer Delft3D)	105
Figuur 6-4: Diepte gemiddelde snelheid bij Rijnmaxschip (uitvoer Delft3D)	106
Figuur 6-5: Waterspiegel variatie rondom Rijnmaxschip (uitvoer Delft3D)	107
Figuur 6-6: Kanaalprofiel (2) met twee schepen (uitvoer Delft3D).....	110
Figuur 6-7: Kanaalprofiel (2) met twee schepen (uitvoer Delft3D).....	110
Figuur 6-8: Model uitvoer(D3D) van twee oplopende schepen in kanaalprofiel (3), $V_s = 0,7V_{lim}$.	113
Figuur 6-9: Kanaalprofiel (3) met twee schepen, $V_s = 4,5$ m/s en $V_s = 2,25$ m/s (uitvoer Delft3D)	113

Figuur 6-10: Kanaalprofiel (3), twee schepen $V_s=4,50$ m/s en $V_s=2,25$ m/s (uitvoer Delft3D)...	114
Figuur 6-11: Grafiek optredende retourstroom max. profiel (3)=1,56 m/s en profiel (2)=1,98 m/s	118
Figuur 8-1: Representatief kanaalprofiel voor Amsterdam-Rijnkanaal (kanaalprofiel (3)).....	126
Figuur 1-1: Overzichtskaart Nederland met daarin het Amsterdam-Rijnkanaal aangegeven.....	135
Figuur 1-2: Amsterdam-Rijnkanaal	136
Figuur 1-3: Onderzoekslocatie.....	137
Figuur 3-1: Ondergrond Amsterdam-Rijnkanaal, linker figuur veendikte rechter figuur pleistocene zandlaag	142
Figuur 4-2: Dwarsprofiel volgens legger Westelijke kanaaldijk Amsterdam-Rijnkanaal	145

Lijst met tabellen

Tabel 3-1: Maximale scheepsafmetingen Amsterdam-Rijnkanaal.....	46
Tabel 3-2: Gegevens vervoerstromen in het verleden. [Baars,1991]	47
Tabel 3-3: Aantal schepen per telpunt. [Dienst Verkeer en Scheepvaart, 2008]	47
Tabel 3-4: Kengetallen vloot 1995-2003	49
Tabel 3-5: Geïnstalleerd hoofdvermogen per RWS/CBS-Klasse in nieuwbouwschepen.....	51
Tabel 3-6: Geïnstalleerd boegschroefvermogen in nieuwbouwschepen	51
Tabel 3-7: Snelheid per scheepsklasse.	56
Tabel 4-1: Criteria verschillende locaties	61
Tabel 4-2: Ontgrondingen in meters t.p.v. onderzoekslocatie	62
Tabel 4-3: Voor- en nadelen van verschillende oevers	65
Tabel 4-4: Algemene scoretabel kanaalprofiel.....	71
Tabel 4-5: Vergelijking kosten per punt	75
Tabel 5-1: Maatgevende schepen	77
Tabel 5-2: Getalwaarde voor maximale schroefstraalwerking h=6,00m.	85
Tabel 5-3: Getalwaarde voor maximale schroefstraalwerking h=7,60m.	86
Tabel 5-4: Invoer scheepsgegevens.....	87
Tabel 5-5: Invoer kanaalprofiel.	87
Tabel 5-6: Uitvoer DIPRO modus veilig, $0,9 V_{lim}$	90
Tabel 5-7: Maatgevende retourstroom in verschillende varianten.....	91
Tabel 5-8: Maximale hydraulische belasting variant (1) en (2)	96
Tabel 5-9: Maximale hydraulische belasting variant (3)	96
Tabel 5-10: Verschillende kanaalprofielen	97
Tabel 5-11: Betuwepand d=4,00m.....	98
Tabel 5-12: Noordelijk pand oude situatie $d_s = 3,30m$	98
Tabel 5-13: Noordelijk pand huidige situatie $d_s = 4,00 m$	98
Tabel 6-1: Parameters Delft3D	103
Tabel 6-2: Uitvoer Rijnmaxschip huidige kanaalprofiel.....	107
Tabel 6-3: Uitvoer Rijnmaxschip kanaalprofiel (2).....	108
Tabel 6-4: Stroomsnelheden en waterspiegeldaling kanaalprofiel (3)	108
Tabel 6-5: Waarden maximale retourstroom kanaalprofiel (2)	110
Tabel 6-6: Waarden maximale retourstroom kanaalprofiel (3)	114
Tabel 6-7: Maximale retourstroom kanaalprofiel (2) en (3)	114
Tabel 6-8: Optredende erosie per kanaalprofiel.....	118
Tabel 6-9: Erosie in relatie met onderhoud.....	119
Tabel 4-1: Hydraulische randvoorwaarden C-kering 2006-2011 Westlijke kanaaldijk Amsterdam-Rijnkanaal	143

Lijst van gebruikte parameters

A_c	Natte oppervlakte van het kanaal	[m ²]
A_m	Nat dwarsoppervlak schip	[m ²]
A_s	Natte oppervlakte midscheeps schip	[m ²]
C_{fr}	Schuifspanningscoëfficiënt ten gevolge van retourstroom	[m]
C_{oever}	Invloed type vaarwegoever bij excentrisch varen	[-]
C_3	Coëfficiënt voor type schroef straalbuis 1,17 en 1,43 voor open schroeven	[-]
D_0	Effectieve diameter uitstroomopening boegschroef	[m]
D_p	Schroefdiameter	[m]
D_{bs}	Diameter boegschroef	[m]
D_{50}	Karakteristieke steendiameter	[m]
d_s	Diepgang schip	[m]
F_1	Coëfficiënt	[-]
f_p	Percentage van geïnstalleerd vermogen	[%]
g	Gravitatie versnelling (9,81m/s ²)	[m/s ²]
h	Waterdiepte kanaal	[m]
k	Taludfactor	[-]
k_s	Bodemruwheid	[m]
K_T	Stoot coëfficiënt of dimensieloze relatie tussen voortstuwingskracht	[-]
k_1	Invloed vaarwegbegrenzing op lengte kernzone	[-]
$k(\alpha_u)$	Theoretische dimensieloze lengte van de kernzone	[-]
L_s	Scheepslengte	[m]
l_m	Mengweglengte	[m]
n	Aantal omwentelingen	[r/min]
P	Druk	[N/m ²]
P_s	Geïnstalleerd vermogen hoofdschroef	[kW]
P_{bs}	Toegepast vermogen boegschroef	[kW]
q_s	Transportintensiteit	[m ³ /m/s]
Q_s	Materiaaltransport per scheepspassage	[m ³ /m]
r	Afstand loodrecht op as van de hoofdschroef	[m]
r_{bs}	Kortste afstand van as boegschroef tot oeververdediging	[m]
u_{axis}	Stroomsnelheid in as hoofdschroef op afstand x achter het schip	[m/s]
u_o	Axiale uitstroomsnelheid direct achter de boegschroef	[m/s]
u_1	Stroomsnelheid naast schip bij een boegschroef in scheepsvast assenstelsel	[m/s]
$u_{x,r}$	Uitstroomsnelheid hoofdschroef op afstand x,r	[m/s]
u_{single}	Maximaal optredende stroomsnelheid bij gebruik van één schroef, op locatie x,r	[m/s]
$u_{max,varend}$	Maximale stroomsnelheid bij een varend schip	[m/s]
u_{max}	Maximale stroomsnelheid bij stilliggend schip	[m/s]
u_o	Uitstroomsnelheid hoofdschroef	[m/s]
$u_{s,0}$	Uitstroomsnelheid in as hoofdschroef	[m/s]
$u_{s,x}$	Uitstroomsnelheid in as hoofdschroef op afstand x	[m/s]
\hat{u}_r	Maximale retourstroom	[m/s]
u_{bs}	Schroefstraalsnelheid aan de oever bij een boegschroef	[m/s]
u_x	Stroomsnelheid boegschroef in x-richting	[m/s]
u_r	Retourstroom	[m/s]
u_y	Stroomsnelheid boegschroef in y-richting	[m/s]
u_m	Stroomsnelheid in de straalas aan de oever	[m/s]

$\bar{U}_{r,ship}$	Gemiddelde retourstroomsnelheid in scheepvaart	[m/s]
V_{lim}	Grenssnelheid, limietsnelheid van het schip	[m/s]
V_s	Vaarsnelheid schip	[m/s]
$V_{s,rel}$	Vershil in vaarsnelheid schepen	[m/s]
X_{bs}	Afstand in x-richting vanaf uitstroomopening boegschroef tot waar de schroef straal de opening raakt	[m]
x	Karakteristieke afstand	[m]
X	Factor (0,10 á 0,20) L_s	[-]
ρ_w	Soortelijke dichtheid water (1000 kg/m ³)	[kg/m ³]
θ_1	Hoek waaronder de schroefstraal de oever bereikt	[°]
α_u	Stroomsnelheidsverhouding bij boegschroeven	[-]
ξ_{bs}	Afstand langs straalas tot locatie waar de straal de oever raakt	[m]
ζ	Energieverliesfactor bij boegschroeven	[-]
Ψ	Stroom- of schuifspanningsmeter	[-]
$\hat{\tau}$	Maximale schuifspanning	[N/m ²]
ρ	Dichtheid water	[kg/m ³]
ρ_s	Dichtheid bodemmateriaal	[kg/m ³]
Δ	Relatieve dichtheid $\Delta = \frac{\rho - \rho_s}{\rho}$	[-]
ϕ	Transportparameter	[-]
K	Von Karman coëfficiënt	[-]
μ	Ribbelfactor gesteld op 1,00	[-]
Δt	Tijdsinterval	[s]
ν	Eddy viscosity	[N/m ²]

1 Inleiding

De laatste jaren is er een stijging te zien in het goederenvervoer over de binnenwateren. Deze uitwisseling van goederen vindt plaats tussen havens onderling, zoals Rotterdam, Amsterdam en Antwerpen. Het Amsterdam-Rijnkanaal is onderdeel van een belangrijke verbinding tussen de Amsterdamse haven en het Ruhrgebied in Duitsland. Het Amsterdam-Rijnkanaal is ook een belangrijke transportas voor de binnenvaart tussen Noord en Zuid Nederland. In figuur 1-1 zijn de vervoerstromen in Europa weergegeven, in bijlage 1 is een overzichtskaart met de locatie van het Amsterdam-Rijnkanaal toegevoegd.



Figuur 1-1: Vervoersstromen in Europa

Het Amsterdam-Rijnkanaal is de verbinding tussen het IJ bij Amsterdam en de Waal bij Tiel, zodat Amsterdam, Utrecht, Wijk bij Duurstede en Tiel over water met elkaar verbonden zijn. Samen met het Lekkanaal is het Amsterdam-Rijnkanaal een onderdeel van de scheepvaartroute Antwerpen – Rotterdam – Amsterdam. De totale lengte van het Amsterdam-Rijnkanaal is 72 kilometer. Het kanaalprofiel bestaat in hoofdzaak (ongeveer 50 kilometer) uit een gebroken bakprofiel met als oeverbescherming stalen damwanden. De resterende kilometers van het kanaal bestaan uit een trapeziumvormig profiel met een taludoever.

Op verschillende plaatsen is de stabiliteit van de damwand in het geding. De gedachte is dat dit te wijten is aan de toenemende verkeersintensiteit en de schaalvergroting (schepen worden groter) in de binnenvaart. Rijkswaterstaat Utrecht zal binnen korte tijd investeringen moeten doen om de kwaliteit van de oevers van het Amsterdam-Rijnkanaal op het vereiste niveau te brengen en te houden. Dit betekent dat vóór 2018 een oplossing gevonden dient te worden voor ca. dertig kilometer damwand. In verband hiermee is verder onderzoek naar alternatieven voor een kanaalprofiel en optredende hydraulische belastingen wenselijk. Om een oplossing te vinden heeft Rijkswaterstaat onderwerpen aangeboden die verder uitgewerkt dienen te worden.

In dit onderzoek zal verder ingegaan worden op de hydraulische belastingen gegenereerd door schepen in het Amsterdam-Rijnkanaal en de daarbij behorende erosie. De uitkomsten van het onderzoek dienen een beter beeld te geven van de optredende belastingen veroorzaakt door de schepen in het kanaal. Een uitspraak over de optredende erosie is van belang om een robuust

kanaalprofiel te ontwerpen. Een nieuw kanaalprofiel dient de komende 50 jaar te voldoen. Het nieuwe dwarsprofiel van het kanaal dient inpasbaar te zijn op een nader te bepalen deeltraject van het Amsterdam-Rijnkanaal.

Het doel van dit onderzoek is om stabiele oevers, bevaarbaarheid en maatschappelijke functies in één dwarsprofiel te combineren, zodat voor het Amsterdam-Rijnkanaal een dwarsprofiel ontwikkeld wordt dat in de toekomst voldoet aan het toenemend aantal grotere schepen en tegelijkertijd maatschappelijk verantwoord is.

Met het eendimensionale programma DIPRO worden de retourstroom en waterspiegeldaling rondom een maatgevend schip bepaald. Verder zal onderzoek gedaan worden naar de hydraulische belasting door hoofdschroef en boegschroef. Vervolgens zal onderzocht worden wat de mogelijkheden zijn om in Delft3D een 2D model te maken voor de retourstroom en waterspiegeldaling (primaire waterbeweging). In het verleden zijn vuistregels gehanteerd voor het bepalen van de waterdiepte voor kanalen, deze vuistregels zijn gerelateerd aan de waterdiepte en diepgang van het schip. In dit verslag wordt verder onderzoek gedaan naar de toepasbaarheid van deze vuistregels voor de nieuwe grotere schepen die de laatste jaren gebouwd zijn.

De volgende onderdelen komen in het rapport aan de orde:

- Bepalen van onderzoekslocatie;
- Bepalen van nieuw representatief kanaalprofiel;
- Bepalen van hydraulische belastingen;
- Gebruik van modelleerprogramma om betere uitspraak te doen over de maatgevende hydraulische belasting;
- Inpassen van een nieuw kanaalprofiel op een representatieve locatie, daarbij rekening houdend met maatschappelijke functies rondom het kanaal.

Leeswijzer:

In hoofdstuk twee wordt de geschiedenis van het Amsterdam-Rijnkanaal en de huidige situatie beschreven, met daaraan gekoppeld de aanleiding tot het onderzoek. Daaruit volgt de probleemstelling die gevolgd wordt door de doelstelling en de opdrachtformulering. De aanpak van het onderzoek is verwoord in de methodiek omschrijving. Hoofdstuk drie geeft een beeld van de relevante beschikbare informatie rondom het Amsterdam-Rijnkanaal. In dit hoofdstuk komen uiteenlopende zaken aan de orde. Dit heeft te maken met de vele belangen die rondom het Amsterdam-Rijnkanaal spelen. In hoofdstuk vier wordt een representatief kanaalgedeelte gekozen als onderzoekslocatie. Voor deze locatie zal een nieuw dwarsprofiel bepaald worden aan de hand van een multicriteria-analyse. Aan de hand van de gekozen variant wordt in hoofdstuk vijf onderzoek gedaan naar de optredende hydraulische belastingen. Een maatgevende hydraulische belasting zal bepaald worden. Het zesde hoofdstuk geeft een gedetailleerde weergave van de maatgevende hydraulische belasting, deze belasting zal verder in Delft3D gemodelleerd worden met een 2D model. Het zevende hoofdstuk beschrijft de inpassing van het kanaalprofiel op de onderzoekslocatie en de toetsing aan het programma van eisen. Hierin zullen ook de maatschappelijke belangen meegenomen worden. De conclusies volgen in hoofdstuk acht, waarna in hoofdstuk negen nog aanbevelingen worden gegeven.

2 Achtergronden

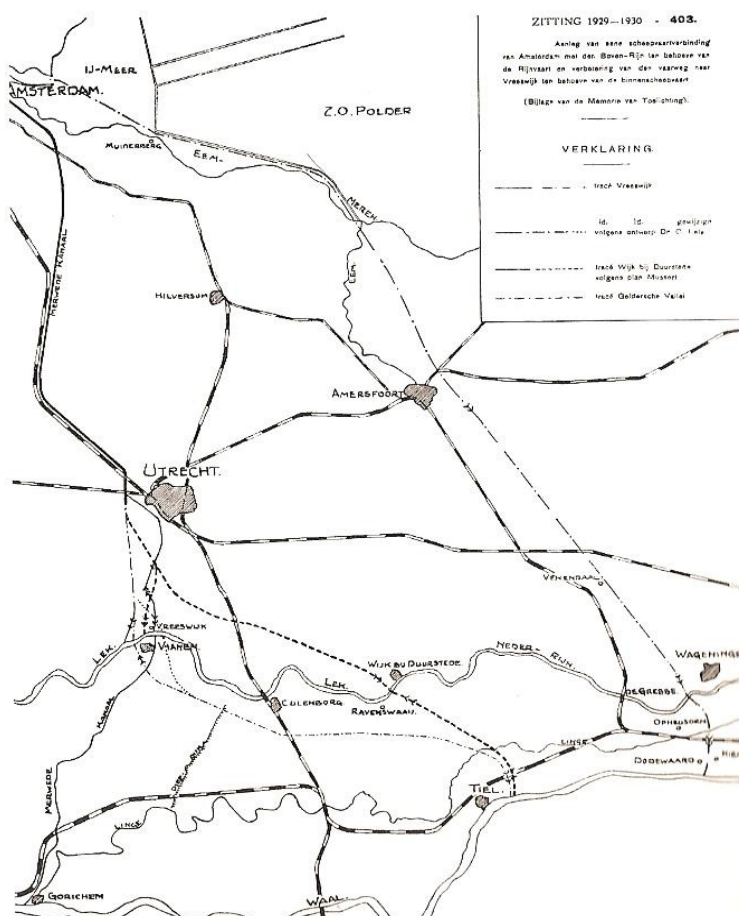
In dit hoofdstuk wordt in de eerste paragraaf de geschiedenis van het Amsterdam-Rijnkanaal toegelicht. In de tweede paragraaf is beknopt de huidige situatie beschreven, waarna in de derde paragraaf de aanleiding tot het project wordt gegeven. Uit de aanleiding van het project volgt dan de probleemstelling, waaraan de doelstelling, opdrachtformulering en het programma van eisen gekoppeld wordt. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een paragraaf methodiek, waarin een schema opgenomen is met een overzicht van het onderzoek.

2.1 Geschiedenis

De binnenvaart van Amsterdam naar Keulen gaat terug tot de middeleeuwen. In die tijd werden er ook al kanalen en sluisen gebouwd en werden de rivieren gereguleerd. Zo was er in 1676 al een beurtvaartdienst met zes schepen tussen Amsterdam en Dusseldorf. Veel scheepvaart ging van Amsterdam via de Vecht naar Utrecht en vervolgens over de Lek en de Rijn naar Keulen en verder tot aan Zwitserland. [Greup, 1954]

In de Franse tijd was er een sterke vermindering van de Rijnvaart. Na de bevrijding van de Fransen in 1813 werden de handelsverbindingen weer aangetrokken. Wel was het vaarwegennet erg verwaarloosd in de Franse tijd.

Rond 1830 liep de vaarroute van Amsterdam naar de Rijn via Weesp, Utrecht, Vreeswijk en Wijk



bij Duurstede. Al in deze tijd was er sprake van om de bevaarbaarheid te waarborgen en zo de concurrentie met andere steden voor de Rijnvaart aan te gaan. Rond 1850 waren er zoveel problemen met het vaarwater dat de rijksoverheid het benoemde tot Rijkswater om zo het rivieren- en kanalenstelsel onder supervisie van de overheid te brengen. In het begin van 1900 werd ook veel gebruik gemaakt van het aangelegde Merwedekanaal. Het Merwedekanaal had een bodembreedte van 20 meter en een waterdiepte van 3,10 meter. Enige tijd na de opening van het kanaal kon het de hoeveelheid schepen al niet meer aan. De Rijksoverheid heeft vervolgens verschillende studies laten doen naar een alternatief. In een openbare vergadering van de Kamer van Koophandel van 20 mei 1930, waar de verschillende alternatieven werden voorgesteld, zie figuur 2-1, werd het "Wijk bij Duurstede-plan" gekozen (het huidige traject). In dit traject zijn

Figuur 2-1: Verschillende trajecten [Baars 1991]

de volgende afmetingen van het kanaal bepaald: het gedeelte tussen Amsterdam en Utrecht krijgt een bodembreedte van 50 meter, een breedte op de waterlijn van 74 meter en een waterdiepte van 4,00 meter. De bodembreedte voor het Betuwepand werd gesteld op 40 meter met een waterdiepte van 4,00 meter.

In 1930 werd een wetsvoorstel ingediend met betrekking tot de aanleg van een scheepvaartweg via Wijk bij Duurstede naar Tiel ten behoeve van de Rijnvaart en van een zijtak van dit kanaal naar Vreeswijk ten behoeve van de binnenvaart. In maart 1931 werd het wetsvoorstel aangenomen. Dit leidde de werkzaamheden in, die toen naar verwachting tien jaar zouden duren. De Duitse bezetting haalde een streep door de verwachting, dat het gehele kanaalpand van Amsterdam tot Wijk bij Duurstede in 1941 en het Betuwepand in 1942 tot Tiel gereed zou zijn. Door de oorlogsomstandigheden vertraagde de bouw van het kanaal aanzienlijk, tijdens de oorlog kwamen de werkzaamheden zelfs helemaal stil te liggen. Het kanaal zelf kwam ongeschonden uit de oorlog, zodat na de oorlog de bouw van het kanaal weer hervat kon worden. In 1948 kwam er genoeg geld vrij om de werkzaamheden weer te hervatten. Na de opening van de sluis in Tiel kon het Amsterdam-Rijnkanaal op 21 mei 1952 opengesteld worden voor scheepvaart.

In de jaren na het gereedkomen van het kanaal namen de afmetingen en de snelheden van de schepen sterk toe, bovendien steeg ook het aantal schepen. In de jaren '60 kwam op de Rijn de duwvaart op. Rotterdam kon daarvan profiteren, maar Amsterdam niet. De afmetingen van het kanaal waren immers niet op de duwvaart berekend en de sluisen waren niet breed genoeg. Amsterdam wendde zich opnieuw tot de minister van Verkeer en Waterstaat om verbetering in de situatie te brengen. Dit leidde ertoe dat het Amsterdam-Rijnkanaal voor de duwvaart geschikt gemaakt zou worden. Na uitgebreide proeven werd voor het kanaalprofiel een breedte van 100 meter en een diepte van 6,00 meter vastgesteld, de diepgang voor de duwvaart was beperkt tot 3,30 meter

Bij vervanging of nieuwbouw van bruggen zou rekening worden gehouden met een mogelijke verbreding van het kanaal in de toekomst tot 130 meter. Aan dit voorstel is echter weinig aandacht meer besteed, waardoor verbreding tot 130 meter op veel plaatsen niet meer mogelijk is.

Aangezien bij de eerste aanleg van het kanaal de oevers in taludvorm waren uitgevoerd en verder bij de aanleg van de kanaaldijken rekening gehouden was met een verbreding, kon de verbreding tot 100 meter van het gedeelte tussen Amsterdam en Maarsse van worden verwezenlijkt door aan beide oevers stalen damwanden te slaan en daartussen het kanaal op breedte en diepte te baggeren. Het gedeelte Maarsse-Utrecht, dat ingeklemd lag tussen fabriekscomplexen en andere bebouwing, liet geen grotere breedte dan 70 meter toe. Voorbij dit gedeelte kreeg het kanaal tot Wijk bij Duurstede ongeveer een breedte van 100 meter eveneens met stalen damwanden. Het gedeelte vanaf Wijk bij Duurstede tot aan Tiel werd eveneens verbreed en behield een taludoever. Ook de sluisen bij Tiel en Wijk bij Duurstede werden in de jaren '70 geschikt gemaakt voor de duwvaart.

Hierna was er even rust rond het Amsterdam-Rijnkanaal. Maar Amsterdam wilde optimaal van het Amsterdam-Rijnkanaal profiteren, de duwvaart kon dan wel zonder te ontkoppelen naar Amsterdam varen, maar de diepgang van die duwvaart werd beperkt tot 3,30 meter. Bij volledig benutten van het laadvermogen zou die diepgang naar de 4,00 meter moeten. Er waren echter een aantal knelpunten. In 1989 besloot de minister van Verkeer en Waterstaat deze knelpunten aan te pakken en werd met de gemeente Amsterdam



Figuur 2-2: Kering en sluiseland Zeeburg

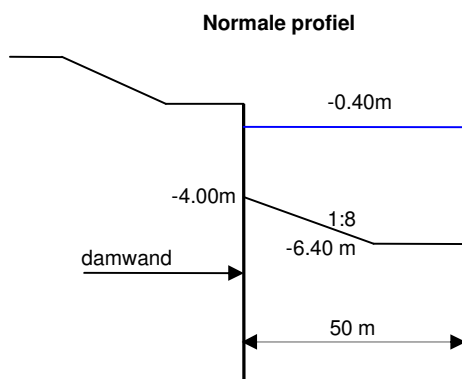
overeenstemming bereikt om het kanaal bevaarbaar te maken voor schepen met een diepgang van 4,00 meter. Dit werk werd in 1994 voltooid. De hoogwaterkering bij Zeeburg, zie figuur 2-2, werd verwijderd omdat de hoogwaterkering die aanwezig was is komen te vervallen met het verdiepen van het kanaal. Hierdoor zijn de functies van de sluis en het sluseiland ook komen te vervallen. Met de sloop van het sluseiland wordt het kanaal verbreed en is er een obstakel minder. Plannen voor de sloop van het sluseiland zijn in ontwikkeling. Na 2000 is de schaalvergroting in de binnenvaart doorgegaan, dit leidde voornamelijk tot grotere schepen en hogere scheepsvermogens. Bij de Prinses Beatrixsluis is een capaciteitsprobleem geconstateerd voor de verkeersintensiteit, ook geeft deze sluis beperkingen voor de scheepsafmetingen. Dit zal weer leiden tot aanpassingen in het Amsterdam-Rijnkanaal.

2.2 Huidige situatie

Het Amsterdam-Rijnkanaal is een van de drukst bevaren kanalen in Nederland, en maakt deel uit van de binnenvaartverbinding tussen Amsterdam-Rotterdam-Antwerpen en ook richting het Ruhrgebied. De uitwisseling van goederen tussen deze havens is in de loop van de jaren gestegen. Door schaalvergroting zijn de afmetingen van de schepen de laatste jaren sterk toegenomen, het aantal schepen is redelijk constant gebleven. Op het kanaal varen schepen tot klasse VIb (CEMT-classificatie). In bijlage 2 staan de afmetingen volgens de classificatie vermeld.

Het Amsterdam-Rijnkanaal is te verdelen in twee hoofddelen. Deze tweedeling is als volgt: het Noordelijke pand en het Betuwepand. Het Noordelijke pand loopt vanaf Amsterdam tot aan Wijk bij Duurstede en het Betuwepand loopt van Wijk bij Duurstede tot aan Tiel. Door deze onderverdeling toe te passen zijn er twee representatieve dwarsprofielen.

Op het Noordelijke pand is het normale profiel toegepast (gebroken bakprofiel), zie figuur 2-3. Dit heeft een breedte op de waterlijn van 100 meter en de waterdiepte is 6,00 meter. De oeverconstructie bestaat uit een damwand en een onderwater talud.

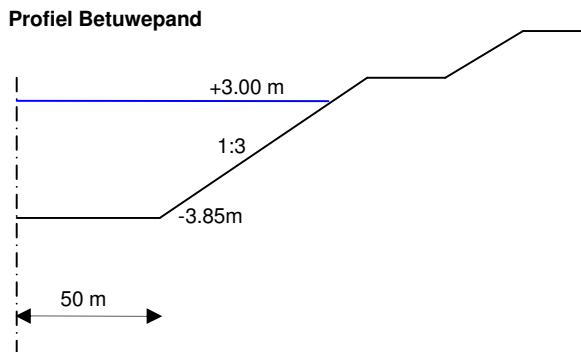


Figuur 2-3: Profielschets Noordelijke pand

Dit type dwarsprofiel is over ongeveer 50 kilometer toegepast, variërend in breedte van 60-100 meter. In het Noordelijke pand voldoet de oeverconstructie op een groot aantal plaatsen niet meer aan de huidige normen, en zijn problemen geconstateerd met betrekking tot de stabiliteit van de damwand.

Op het Betuwepand is een trapeziumvormig profiel toegepast. Dit heeft een bodembreedte van 100 meter, de gemiddelde waterstand is N.A.P. +3.00 meter, afhankelijk van de afvoer van de Lek. Het bodemniveau bevindt zich op een N.A.P. -3,85 meter, zodat de waterdiepte dan gemiddeld 6,85 meter bedraagt. De oever bestaat uit een talud die rond de waterlijn beschermd

is door een oeverbestorting. In figuur 2-4 is het kanaalprofiel met taludoever te zien dat in het Betuwepand toegepast is. In het Betuwepand zijn geen problemen geconstateerd.



Figuur 2-4: Profielschets Betuwepand

2.3 Aanleiding tot onderzoek

In de geschiedenis is telkens weer een trend te zien dat schepen groter worden en dat de infrastructuur daar na verloop van tijd op aangepast wordt. Soms volgen deze aanpassingen elkaar relatief snel op. Een duidelijke trend is dat de infrastructuur traag reageert op veranderingen. Het kanaal aanpassen kost aanzienlijk meer tijd dan het aanpassen van de afmetingen en de vermogens van de schepen. In de laatste jaren is duidelijk te zien dat er steeds grotere schepen in de vaart genomen worden. Deze schepen zijn in de lengte en de breedte toegenomen en hebben een grotere diepgang. In het kanaal zijn begin jaren '90 schepen toegelaten met een diepgang van 4,00 meter in plaats van 3,30 meter. Deze grotere schepen zullen naar verwachting hogere hydraulische belastingen op de bodem en oeverconstructie genereren.

Op dit moment is nog geen duidelijk beeld beschikbaar van de effecten van grotere schepen en de optredende hydraulische belastingen die veroorzaakt worden door meerdere schepen. Daarom zal verder onderzoek naar deze hydraulische belastingen gedaan worden, en de erosie die daarbij hoort.

In het Amsterdam-Rijnkanaal staat 100 kilometer damwand waarvan 60 kilometer niet voldoet. Voor de helft van deze 60 kilometer damwand dient voor 2018 een vervangend alternatief gezocht te worden.

Binnen Rijkswaterstaat zijn verschillende inzichten over de aanpak van het Amsterdam-Rijnkanaal. Als door erosie de oeverconstructie instabiel wordt of bezwijkt zijn sommigen van mening dat de huidige strategie van RWS, oude damwanden vervangen door nieuwe langere damwanden, doorgezet kan worden. Een andere mening binnen Rijkswaterstaat is dat een damwand die één meter boven de waterspiegel uitsteekt discutabel is. De mening is dat het esthetisch niet verantwoord is, en vanuit ecologisch standpunt onacceptabel. Een damwand biedt geen mogelijkheid voor uitwisselingen van fauna tussen land en water, zie ook BPRW 2010-2015. Voor een goed alternatief is uiteraard onderzoek nodig.

2.4 Probleemstelling

In dit hoofdstuk zal de probleemstelling aan de orde komen, vanuit het probleem kan dan het doel geformuleerd worden. Vanuit de doelstelling zal de opdrachtformulering gegeven worden.

Op het Amsterdam-Rijnkanaal treden in het Noordelijke pand (gebroken bakprofiel) problemen op ter plaatse van de damwanden:

- Instabiliteit van de damwanden;
- Oeverzuiging, die tot ongelukken kan leiden;
- Hinderlijke golfslag;
- Maatschappelijke ontwikkelingen.

Het grootste probleem is dat de stabiliteit van de damwanden ondermijnd wordt door erosie. Het bezwijken van instabiele damwanden kan gevolgen hebben voor het achterliggende dijklichaam. In het ergste geval bezwijkt ook de waterkerende constructie wat overstroming tot gevolg heeft. De hydraulische belastingen die erosie genereren kunnen alleen veroorzaakt worden door de scheepvaart, verdere stroming is er niet op het kanaal. De hydraulische belastingen bestaan onder andere uit retourstroom, waterspiegeldaling, schroefstralen en golven die door de scheepvaart worden veroorzaakt. De hydraulische belastingen veroorzaakt door de grote schepen zijn de laatste decennia toegenomen door de schaalvergroting. Door de hoge verkeersintensiteit op het kanaal varen schepen vaak dicht langs de wal zodat anderen kunnen passeren. De combinatie van grotere schepen en meerdere schepen op het kanaal zorgt ervoor dat de toename van de hydraulische belastingen niet geheel duidelijk is. Daardoor wordt het ontwerp van een nieuw kanaalprofiel bemoeilijkt.

Een bijkomend aspect is dat de damwanden aan het einde zijn van de technische levensduur en dat daar een oplossing voor gezocht dient te worden.

Oeverzuiging leidt soms tot ongevallen en dit geeft problemen. Dit treedt vooral op als schepen niet in het midden van het kanaal, maar dicht aan de kant varen. Dit veroorzaakt een sterke retourstroom dicht bij de oeverconstructie, waardoor het schip naar de oever gedrukt zal worden. Het dicht langs de kant varen kan erosie tot gevolg kan hebben.

Een bakprofiel is een verticale oeverconstructie waardoor golven niet kunnen uitdempen. Dit genereert een staande golf die reflecteert in het kanaal. Dit geeft hinderlijke golfslag op het kanaal en een onrustig vaarbeeld, zie figuur 2-5. Door de golven ontstaat er een soort klotseffect, het kanaal wordt soms ook wel een 'klotbak' genoemd. Voor kleinere schepen en recreatievaart kan dit hinderlijk zijn.



Figuur 2-5: Klotbak

De onderstaande foto's geven de problemen aan, veroorzaakt door erosie, wat weer instabiliteit van de damwanden veroorzaakt.



Figuur 2-6: Voorover hellen damwand



Figuur 2-7: Erosie achter damwand



Figuur 2-8: Scheuren in wegdek t.g.v. verlaging bodem door erosie

Binnen Rijkswaterstaat heeft het kanaal vooral een 'transport functie'. De transportsector vindt recreatievaart en andere activiteiten die geen transportfunctie hebben op het kanaal hinderlijk. Uit veiligheidsoverwegingen wordt de recreatievaart geadviseerd via de Vecht te varen. Het kanaal heeft op dit moment een industrieel karakter, waardoor de omgeving geen meerwaarde ondervindt van het kanaal. Zo zijn ten westen van Utrecht grote nieuwe woonwijken gebouwd en daardoor ligt het kanaal 'midden' in de stad. Het huidige gebroken bakprofiel heeft vanuit esthetisch oogpunt geen meerwaarde voor de omgeving. Ook heeft het voor de natuur geen voordelen, er zijn geen fauna uittredeplaatsen (FUP) waardoor er geen uitwisseling plaats vindt tussen dieren die in het water leven en op het land.

De vraag is nu: "Zijn er mogelijkheden om een nieuw profiel aan te leggen om zo transport, recreatie en natuur samen te laten gaan?"

2.5 Doelstelling/Opdrachtformulering

Het doel van dit onderzoek is om een representatief kanaalprofiel te dimensioneren. Het is van belang dat transport, recreatie en natuur samen kunnen gaan. Een representatief kanaalprofiel is zodanig ontworpen dat het kanaal goed bevaarbaar is en waarbij de stabiliteit van de oevers gewaarborgd wordt. Hierbij wordt niet alleen rekening gehouden met de hydraulische belastingen in het kanaal, maar ook met de omgevingsfactoren, zoals de beschikbare ruimte op de locatie. Ook zal rekening gehouden worden met de maatschappelijke ontwikkelingen ter plaatse.

De opdracht is als volgt samengevat:

Het ontwikkelen van een dwarsprofiel met stabiele oevers waarbij rekening gehouden wordt met toekomstige ontwikkelingen, duurzaamheid en recreatie.

Bij deze opdracht kunnen vragen geformuleerd worden, zoals:

- Welke hydraulische belastingen treden op in het kanaal en wat zijn de gevolgen hiervan voor de oeverconstructie en de bodem?
- Welk type dwarsprofiel voldoet aan de huidige en toekomstige eisen?
- Welke ontwikkelingen worden verwacht op het gebied van scheepvaart en goederenvervoer?
- Welke maatschappelijke ontwikkelingen zijn van belang voor de ontwikkeling van een nieuw dwarsprofiel?
- Welke gevolgen heeft dit dwarsprofiel voor de scheepvaart en omgeving?
- Is het mogelijk om natuur, recreatie en beroepsvaart samen te laten gaan in het kanaal?

2.5.1 Programma van eisen

Om tot een goed ontwerp te komen wordt een programma van eisen opgesteld. Tijdens het vooronderzoek is meer inzicht verkregen in de omvang van het project, de wensen van Rijkswaterstaat en welke mogelijkheden er liggen. Om het afstudeerproject af te bakenen zijn de wensen van de verschillende afdelingen van Rijkswaterstaat naast elkaar gelegd en gefilterd en waarna de eisen door de student zijn vastgelegd.

Eisen:

- Het kanaal dient goed bevaarbaar te zijn:
 - De hinderlijke oeverzuiging, die soms tot ongevallen leidt, dient zoveel mogelijk verminderd te worden;
 - De huidige golfhinder, die nu optreedt door het klotseffect in het normale profiel, dient in de nieuwe situatie zoveel mogelijk voorkomen te worden;
 - Natte doorsnede kanaalprofiel minimaal 600m² [Roelse, 2005];
- De nieuwe oeverconstructie dient minimaal 50 jaar mee te gaan;
- De waterkering moet aan de geldende eisen voldoen of de kwaliteit van de waterkering moet minimaal gelijk zijn aan de huidige situatie;
- Barrièrewerking van 'harde' oeverconstructie opheffen of verkleinen (voor fauna en flora);
- Stabiele oeverconstructie;
- Voor 2018 dient 30 kilometer oeverconstructie aangepast te worden.

Uitgangspunten:

- Het kanaal dient geschikt te zijn voor een veilige afwikkeling van schepen uit de scheepsklasse CEMT VIb, dit schip is 200 meter lang, 23,00 meter breed en heeft geladen een diepgang van 4,00 meter;
- Veiligheid moet gegarandeerd blijven.

Randvoorwaarden:

- Scheepvaartverkeer moet te allen tijde doorgang vinden;
- Mogelijkheden voor aanleg natuurvriendelijke oevers optimaal benutten;

2.5.2 Afbakening

In dit rapport moet de lezer geen uitgebreide planologische uiteenzetting verwachten, ook zal een uitgebreid bestuurlijk verhaal achterwege gelaten worden. Het economische aspect, zoals een kosten-baten analyse, zal buiten beschouwing blijven. Wel zal op veel zaken algemeen ingegaan worden om zo het onderzoek in de juiste context te plaatsen.

Een uitgebreide kosten analyse zal verder niet opgenomen worden in het verslag. Voor een prijsbepaling zullen globale prijzen gebruikt worden, om zo de varianten met elkaar te kunnen vergelijken. Dit is voor een variantenuitwerking geschikt, maar niet voor een budget bepaling.

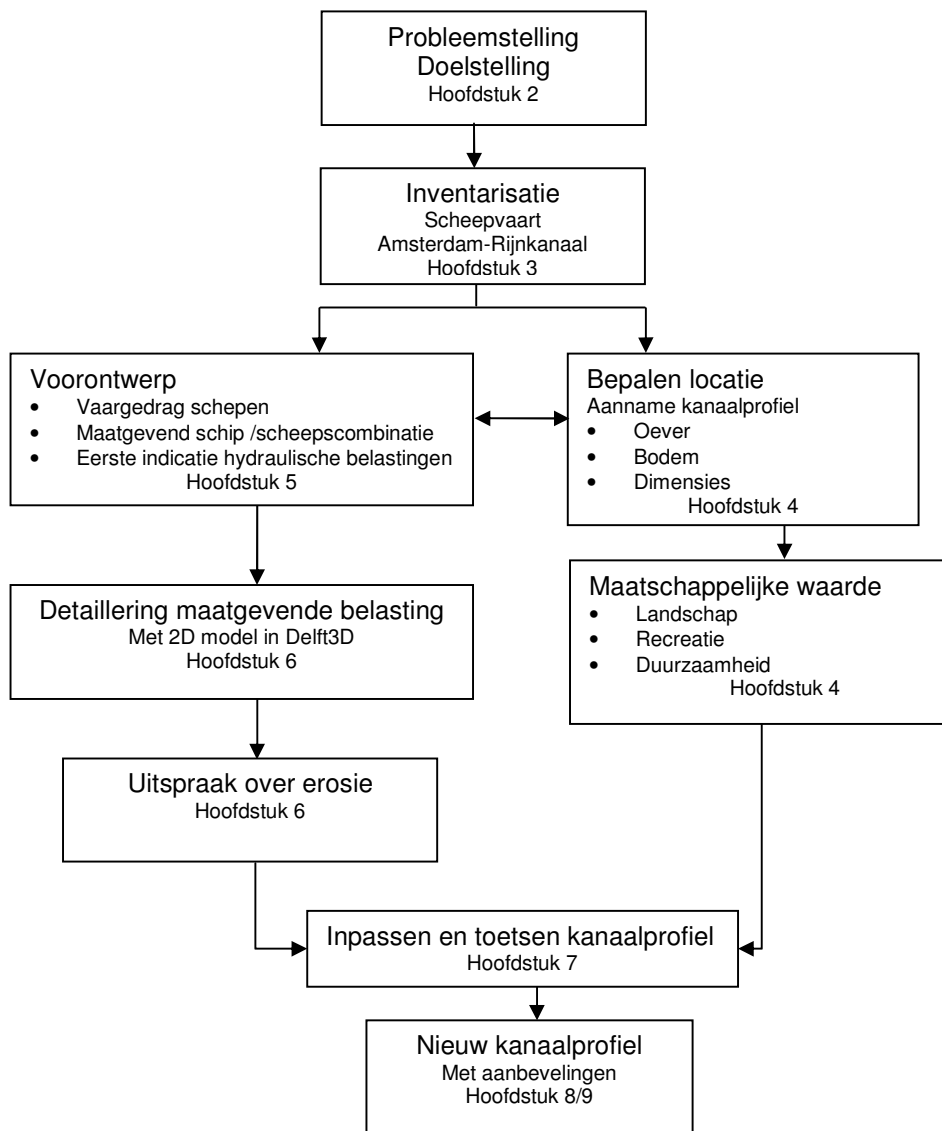
Voor de bepaling van een maatgevend schip is het van belang dat de toekomstige ontwikkelingen meegenomen worden. De Prinses Beatrixsluis wordt ook geschikt gemaakt voor de vierbaksduwvaart. Binnen Rijkswaterstaat worden geen zinspelingen gemaakt op het toelaten van grotere schepen. Er schijnen onderzoeken te zijn die verder op het vaarwegennet ingaan, en daarbij wordt ook gekeken naar grotere afmetingen van schepen. Waarmee dan in de toekomst rekening gehouden dient te worden met de aanleg of aanpassing van sluisen. Omdat vanuit Rijkswaterstaat geen informatie hierover beschikbaar is, zal hiermee geen rekening gehouden worden in het verdere van het verslag. Verder zal in dit verslag geen relatie gelegd worden tussen de verkeersintensiteit en de hydraulische belastingen. De stroming in het

kanaal is nihil en daarom zal dit geen invloed hebben op de hydraulische belastingen en zal dit niet meegenomen worden in verdere berekeningen voor het kanaalprofiel. Zo zijn windgolven niet maatgevend ten opzichte van de scheepsgolven en zullen daarom verder niet meegenomen worden in dit onderzoek. Onder het begrip duurzaamheid vallen de begrippen zoals de levensduur van de constructie en het toepassen van materialen die minimaal 50 jaar meegaan. Onder een duurzaam ontwerp worden zaken als een robuust ontwerp, lange levensduur en prijs kwaliteit verhouding toegepast. Andere definities voor duurzaamheid worden in dit rapport niet toegepast.

2.6 Methodiek

Inventarisatie van de beschikbare informatie is van belang om zo zicht te krijgen in de onderzoeken die in het verleden zijn gedaan en welke zaken er spelen rondom het Amsterdam-Rijnkanaal.

Na de inventarisatie volgt een keuze van de onderzoekslocatie, deze locatie dient representatief te zijn voor het kanaal. Verder zal het kanaal gedimensioneerd worden met de gegevens uit de inventarisatie. Om een juiste afweging te maken zal een multicriteria analyse opgesteld worden. Op het kanaal varen veel verschillende schepen, hieruit zal een maatgevend schip of maatgevende scheepscombinatie gekozen worden die bepalend is voor de optredende belastingen. Met dit schip of deze scheepscombinatie zal verder gerekend worden. Het is van belang dat eerst de hydraulische belastingen van een maatgevend schip bepaald worden. De schroefstraal voor zowel de hoofdschroef en de boegschroef zullen handmatig bepaald worden. Een eerste indicatie voor de primaire waterbeweging, retourstroom en waterspiegeldaling, worden gedaan met behulp van het programma DIPRO (DIimensioning PROtections). Dit eendimensionale programma op basis van de methode van Schijf, kan ook gebruikt worden om te bepalen wat de grenssnelheid van het schip is. Een gedetailleerdere berekening voor de retourstroom en waterspiegeldaling wordt gedaan met Delft3D. Met dit programma wordt een 2D berekening gedaan voor de retourstroom en waterspiegeldaling. Met de maximale hydraulische belasting zal onderzocht worden wat de erosie is in het kanaalprofiel. Om de aanpak verder te verduidelijken is het onderzoek weergegeven in een schema, zie figuur 2-9.



Figuur 2-9: Schema aanpak onderzoek.

Het bepalen van de onderzoekslocatie, een deellocatie van het Amsterdam-Rijnkanaal, is de eerste stap die genomen wordt om tot een nieuw kanaalprofiel te komen. Na het bepalen van de representatieve onderzoekslocatie zal een aanname voor het kanaalprofiel gedaan worden. Onder het blok kanaalprofiel vallen verschillende zaken zoals type oever, dimensies van het kanaal en de ondergrond. Het type kanaalprofiel zal door middel van een multicriteria analyse verder uitgewerkt worden.

Een oever realiseert een overgang tussen land en water. In het schema zien we dat rondom het kanaal verschillende maatschappelijke waarden van belang zijn. Deze waarden dienen ook meegenomen te worden in het ontwikkelen van een nieuw dwarsprofiel

In het blok voorontwerp komen zaken aan de orde die belangrijk zijn voor de verdere bepaling van de hydraulische belastingen die optreden in het kanaal door de scheepvaart. Hierbij zal onderzocht worden wat de belastingen zijn die gegenereerd worden door een maatgevend schip of scheepscombinatie. De verkeersintensiteit speelt in dit onderzoek een ondergeschikte rol. Er

zal onderzocht worden wat de belastingen zijn bij een individueel schip of een scheepscombinatie. De volgende belastingen komen aan de orde bij een varend schip, schroefstraalwerking van de hoofdschroef en van de boegschroef. Het vaargedrag van schepen in het kanaal en de daarbij behorende retourstroom zal ook bepaald worden, dus het varen dicht langs de kant of het oplopen van schepen.

Het eendimensionale programma DIPRO (DImentation PROtections), gebaseerd op de methode Schijf, wordt gebruikt voor het bepalen van de retourstroom en de waterspiegeldaling in 1D. De uitkomsten worden vergeleken met de stroomsnelheden voor de schroefstraalwerking voor de boegschroef en de hoofdschroef. Om de maatgevende hydraulische belasting (retourstroom) gedetailleerder te bepalen zal met het modelleerprogramma Delft3D de primaire waterbeweging rondom een schip in 2D gemodelleerd worden. Om dit 2D model te valideren zijn de uitkomsten van het 1D model DIPRO nodig. Met een 2D model kan gedetailleerder gemodelleerd worden, dan met het 1D programma DIPRO. Waardoor de primaire waterbeweging lokaal gedetailleerder wordt weergegeven. Als de maatgevende hydraulische belasting (stroming) bekend is, kan de erosie bepaald worden die hierbij optreedt, verder zal geen onderzoek gedaan worden naar erosie die optreedt bij een verkeersintensiteit, omdat eerst de erosie gegenereerd door één schip duidelijk dient te zijn.

Een terugkoppeling tussen erosie en een nieuw kanaalprofiel zegt wat over de kwaliteit van het kanaalprofiel. Als blijkt uit berekeningen dat een nieuw kanaalprofiel nog veel erosie geeft dicht bij de oeverconstructie, voldoet het nieuwe kanaalprofiel niet, en zal het kanaalprofiel aangepast dienen te worden zodat de mate van erosie minimaal blijft.

Hierboven leest u dus hoe het nieuwe kanaalprofiel gedimensioneerd wordt. Aanbevelingen worden gedaan zodat verder onderzoek gedaan kan worden.

3 Inventarisatie relevante informatie Amsterdam-Rijnkanaal

In dit hoofdstuk wordt de inventarisatie van de beschikbare en relevante informatie van het Amsterdam-Rijnkanaal beschreven. Voor een overzichtskaart van het Amsterdam-Rijnkanaal in relatie tot heel Nederland zie bijlage 1. Binnen Rijkswaterstaat zijn er veel rapporten verschenen die raakvlakken hebben met het Amsterdam-Rijnkanaal. In dit hoofdstuk zullen de belangrijkste zaken die nodig zijn voor dit onderzoek vermeld worden. Als eerste zal het algemene beeld van het Amsterdam-Rijnkanaal beschreven worden. Waarna dieper op de basis- en gebruiksfuncties ingegaan wordt. In paragraaf 3.3 zal de scheepvaart verder beschreven worden, daarop volgend de ontwikkelingen in de binnenvaart, met de gevolgen daarvan.

3.1 Algemeen beeld Amsterdam-Rijnkanaal

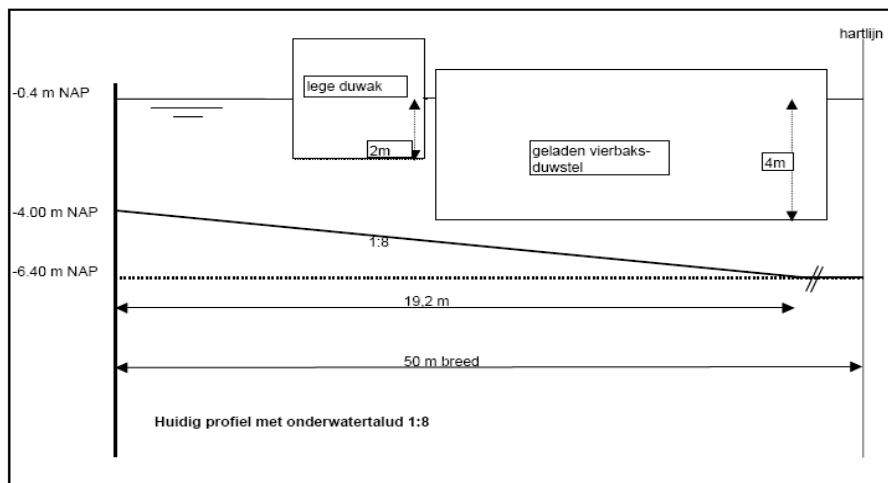
Het Amsterdam-Rijnkanaal neemt in Nederland een belangrijke plaats in voor de binnenvaartverbinding tussen het noorden en zuiden van Nederland. Nederland is een doorvoerland voor de rest van Europa. In deze paragraaf wordt verder uitleg gegeven aan de onderverdeling in het kanaal, ook de sluizen die in het kanaal aanwezig zijn worden verder uitgewerkt.

3.1.1 Onderverdeling in het kanaal

In deze paragraaf wordt een korte uitleg geven over de verschillende trajecten op het Amsterdam-Rijnkanaal. In het Amsterdam-Rijnkanaal is een onderverdeling te maken, namelijk het Noordelijke pand en het Betuwepand. Door Rijkswaterstaat Dienst Utrecht is een verdere onderverdeling gemaakt:

- Zeeburg – Maarssen (km 1-28)
- Maarssen – Nieuwegein (km 28-43);
- Nieuwegein – Wijk bij Duurstede (km 43-59);
- Wijk bij Duurstede – Tiel (km 59-73).

Van kilometer 1-59 is het Noordelijke pand en kilometer 59-74 is het Betuwepand. Omdat op het Betuwepand verder geen problemen optreden is een gedetailleerd figuur achterwege gelaten. Wel wordt het nat oppervlak gegeven van de twee verschillende dwarsprofielen. Op het Betuwepand is een gemiddeld nat oppervlak van 681 m² beschikbaar en op het Noordelijke pand is een nat oppervlak van 554 m² beschikbaar. In figuur 3-1 is een dwarsprofiel te zien van het Noordelijke pand met de bijbehorende afmetingen.



Figuur 3-1: Normaal profiel Amsterdam-Rijnkanaal (noordelijk pand)

Op het eerste traject Zeeburg - Maarssen is het normale profiel van toepassing (gebroken bakprofiel). Dit traject ligt zowel in stedelijk als in landelijk gebied. In de landelijke gebieden is een mogelijkheid om het kanaal te verbreden. Aan de westzijde van het kanaal dient rekening gehouden te worden met de aangrenzende spoorlijn en snelweg, deze loopt vanaf Breukelen t/m kilometer 18 evenwijdig aan het kanaal.

Het gedeelte tussen Maarssen en Nieuwegein ligt in stedelijk gebied en is het smalste gedeelte van het gehele Amsterdam-Rijnkanaal. Hier is het normale profiel toegepast maar dan met een beperking in de breedte. Het smalste gedeelte bedraagt nog geen 70 meter. Omdat de bebouwing naast het kanaal staat, is het op korte termijn niet mogelijk om het kanaal breder te maken. Bij verbreding van het kanaal dienen onteigeningsprocedures meegenomen te worden. Onteigeningsprocedures kennen een lang traject voordat uitvoering gestart kan worden. Door de scheepvaart te begeleiden vanuit de verkeerspost is het mogelijk om de hoge verkeersintensiteiten goed en veilig af te handelen op dit traject.

Het gedeelte Nieuwegein - Wijk bij Duurstede is een ruimer gedeelte waar ook het normale profiel gebruikt is. Rijkswaterstaat geeft aan dat hier mogelijkheden liggen om een eventuele verbreding te realiseren. Dit is mogelijk omdat het kanaal hier overwegend door landelijk gebied loopt.

Tussen Wijk bij Duurstede en Tiel (Betuwepand), heeft het kanaal taludoevers. Hier is het kanaal 100 meter breed op de bodem met taludhellingen van 1:3. Ook is de verkeersintensiteit op dit gedeelte lager dan op de andere delen van het kanaal. Dit heeft te maken met de splitsing bij het Lekkanaal richting de Prinses Beatrixsluizen. Wel varen op dit traject alle schepen die een diepgang hebben die groter is dan 3,50 meter. Deze schepen kunnen niet via het Lekkanaal, vanwege de beperkende diepte van de Beatrixsluis. Rijkswaterstaat heeft op dit traject (Wijk bij Duurstede-Tiel) geen problemen geconstateerd.

3.1.2 Kanaaloever

Een oeverbescherming in het Amsterdam-Rijnkanaal is belangrijk, omdat varende schepen stroming en golven in het kanaal veroorzaken. Deze belastingen tasten de bovenzijde van het talud aan. In het Amsterdam-Rijnkanaal komen veel damwanden voor, door optredende stroming die erosie op de bodem van het kanaal veroorzaakt kan de oeverconstructie aangetast

worden. Uit peilingen blijkt dat in het Amsterdam-Rijnkanaal inderdaad erosie optreedt. Bij Maarssen is het kanaalprofiel het smalst en daar komen ontgrondingen voor tot ongeveer 3,0 meter onder het theoretische profiel, deze ontgrondingen zijn gemeten binnen 15 meter vanaf de damwand. Op veel trajecten ligt de ontgroning tussen de 0,75 tot 2,0 meter. Bij Rijkswaterstaat is de vraag gerezen wat de oorzaak is van deze ontgrondingen, en of voorspellingen gegeven kunnen worden voor de snelheid van eroderen en de maximale ontgroning langs de damwand. Op dit moment is nog weinig inzicht in de ontgrondingen dicht langs de damwandoever. Door variërende hydraulische belastingen kunnen ontgrondingskuilen gaan verplaatsen of weer opnieuw dichtslibben. Hierdoor ontstaat voor de huidige damwandconstructie een variërende bodem. Dit heeft invloed op de krachtsverdeling van de damwandconstructie.

In het Amsterdam-Rijnkanaal is bij het gebroken bakprofiel de bodemdiepte voor de damwand groot. De invloed van ontgrondingen dicht bij de damwand, geven problemen met de oeverconstructie en daardoor aan de oever. Daarom zal in dit verslag de damwand ook als oeverconstructie meegenomen worden.

De hydraulische belastingen op een kanaaloever zijn relatief hoog. Deze hydraulische belastingen zijn afhankelijk van de verkeersintensiteit, vaarsnelheid en de grootte van de schepen. Door de forse belastingen, de doorgaans geringe hoeveelheid beschikbare ruimte in en langs kanalen en de vereiste verhouding breedte/diepte, is doorgaans een verstevigde oeverconstructie nodig [CUR 201].

De huidige oeverbescherming bestaat veelal uit stalen damwanden. Er staat langs het kanaal ongeveer 100 kilometer aan stalen damwanden. De damwanden variëren in lengte. Dit heeft te maken met het verschil in bodemgesteldheid. De lengtes variëren tussen de 7,0 en 12,0 meter.

De huidige staat van de oeverbescherming is onderzocht, uitkomsten van dit onderzoek zijn te vinden in [Arcadis, 2009]. In het onderzoek van [Arcadis, 2009] is 100 km damwand getoetst, waarbij gebleken is dat 60 km niet voldoet aan de gestelde eisen. De belangrijkste oorzaken zijn bezwijken van het anker en instabiliteit van de damwand door erosie. In [Arcadis, 2009] wordt de hydraulische belasting door de scheepvaart niet meegenomen in een nieuwe berekening voor een damwand in het Amsterdam-Rijnkanaal. In [Arcadis,2009] wordt geadviseerd om verder onderzoek te verrichten naar scheepvaartbelasting en bijbehorende problematiek, om eventueel benodigde bodembescherming / oeverbescherming te kunnen berekenen. Ook wordt geadviseerd om rekening te houden met de toekomstige dijk aanpassingen (versterking) over een gedeelte aan de westzijde.

Indien het theoretische profiel aangepast moet worden naar een rechthoekig profiel met een bodemdiepte van NAP -6,40 meter, wordt geschat dat 80 tot 85% van de damwanden niet voldoet. Op dit moment zijn plannen om voor 2018 ongeveer 30 kilometer oever te renoveren omdat deze oever niet meer voldoet. Omdat deze oeverrenovatie voor de komende vijftig jaar moet voldoen, zijn de plannen van Rijkswaterstaat om langere damwanden toe te passen. Hierbij wordt rekening gehouden met een eventuele verdieping tot NAP -6,40 meter over de gehele bodem. Zo ontstaat een rechthoekig profiel, waarbij de onderwatertaluds verwijderd zijn.

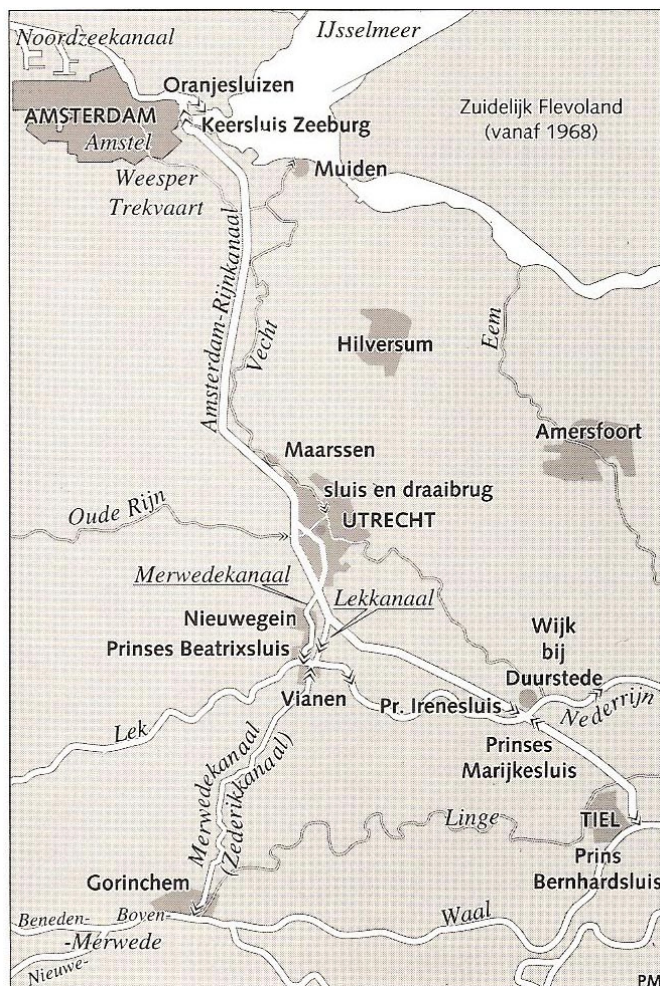
Het vervangen van damwanden is een optie die volgens het strikt toepassen van het beheer en ontwikkelplan voor de Rijkswateren niet mogelijk is. In de BPRW 2010-2015 wordt als voorwaarde gesteld, dat waar mogelijk, groot onderhoud gecombineerd zal worden met het aanleggen van natuurvriendelijke oevers en/of fauna-uittredeplaatsen (FUP).

Verschillende personen binnen Rijkswaterstaat geven aan dat bij een nieuw kanaalprofiel of grootschalig onderhoud, onderzoek gedaan dient te worden naar alternatieven voor het plaatsen van damwanden. Omdat natuurvriendelijke oevers in diverse rapporten aangemerkt worden als

vervanging van damwanden of als een voorwaarde voor compensatie van andere werken, wordt hierop in paragraaf 3.2.4 dieper ingegaan.

In de praktijk zijn er vaak verschillende oplossingen voor een oeverconstructie. De toe te passen oeverconstructie dient een duurzame constructie te krijgen. De oeverconstructie is afhankelijk van de beschikbare ruimte, de functie en de belastingen die optreden. Ook zijn de kosten een belangrijke factor. Deze zijn direct gerelateerd aan het type oever.

Een kanaal is niet natuurlijk ontstaan en bij de aanleg zijn verschillende aardlagen doorsneden. Per locatie kunnen deze lagen verschillen, wat dus een verschil in grondsoort geeft. Elk type grondsoort heeft een eigen sterkte. Verschillende grondsoorten gaan bij een verschillende snelheid eroderen. Er bestaat geen relatie tussen erosiekuilen en grondsoort het vormen van een erosiekuil in sterkere grond duurt alleen langer. Wel is het mogelijk dat in het Amsterdam-Rijnkanaal op plaatsen waar veel erosie voorkomt ook minder sterke grond voorkomt.



3.1.3 Doorvaarthoogte en sluizen

Over het kanaal liggen diverse bruggen, bijna allemaal met een doorvaarthoogte van 9,1 meter. Er zijn nog twee bruggen met een doorvaarthoogte van 8,9 meter. Voor deze bruggen zijn er plannen om ze op te vijzelen, maar hierover moet nog een besluit genomen worden. Bij een doorvaarthoogte van 9,1 meter kunnen schepen vier lagen containers vervoeren wat een lagere prijs per vervoerde container geeft.

Figuur 3-2: Locatie sluisen Amsterdam-Rijnkanaal [Baars, 1991]

Sluizen die bepalend zijn voor het Amsterdam-Rijnkanaal

De volgende sluizen zijn maatgevend voor de diepte en de breedte van het kanaal:

- Oranjesluizen bij Amsterdam: de verbinding Amsterdam-Rijnkanaal met Noordzeekanaal en het IJmeer;
- Prinses Beatrixsluis: die toegang geeft tot de Lek bij Vreeswijk;
- Prinses Marijkesluis: sluis voor hoge waterstanden in de Lek;
- Prinses Irenesluis: verbindt het Betuwepand met het Noordelijke pand;
- Prins Bernhardsluis: verbindt het Betuwepand met de Waal.

Oranjesluizen Amsterdam

De Oranjesluizen is een complex van schutsluizen in het IJ. Ze vormen de grens tussen het Binnen- en Buiten-IJ en dragen bij aan het op peil houden van de waterhoogte in het Noordzeekanaal. Ze zorgen er ook voor dat er niet teveel water uit het Noordzeekanaal in het IJsselmeer komt.

De schutkolken van deze sluizen meten 14 x 67 meter (twee stuks) en 18 x 90 meter. De grote sluis, die in 1995 toegevoegde Prins Willem-Alexandersluis, heeft een kolk van 24 x 200 meter en schuifdeuren. Het Noordelijke pand van het Amsterdam-Rijnkanaal staat direct in verbinding met het IJ en daardoor met de Amsterdamse havens.

Prinses Beatrixsluis

Vanaf de Lek heeft men via de Prinses Beatrixsluis toegang tot het Lekkanaal. Dit Lekkanaal zorgt voor een verbinding tussen de Lek en het Amsterdam-Rijnkanaal. De Prinses Beatrixsluis heeft twee sluiskolken met een diepte van 4,20 meter, een breedte van 18 meter en een lengte van 220 meter. Het Lekkanaal is niet geschikt voor de vierbaksduwvaart, ook is de toegestane diepgang daar 3,30 meter.

Prinses Marijkesluis

Deze sluis is alleen in gebruik wanneer de hoogwaterkering, die naast het sluisencomplex ligt, dicht is. Wanneer de hoogwaterkering dicht is, is er beperkt scheepvaartverkeer mogelijk.

Prinses Irenesluizen

Deze sluizen liggen ter hoogte van Wijk bij Duurstede. De sluizen vormen de verbinding tussen het Noordelijke pand en het Betuwepand. Behalve het schutten van schepen is de sluis ook belangrijk voor de waterhuishouding. In tijden van zeer hoog water op de rivier de Lek hebben de hefdeuren ook een waterkerende functie, zij fungeren dan in feite als dijk. Er zijn twee verschillende sluiskolken. Sluis één is de oudste en is deelbaar in twee secties van ieder 175 x 18 meter, dit geeft een totale lengte van 350 meter. De tweede sluis is een duwvaartsluis van 260 x 24 meter, schepen met vier duwbakken passen hier precies in.

Prins Bernardsluis

Deze sluis heeft net als de Prinses Irenesluis twee verschillende sluiskolken, waarbij de grootste sluis geschikt is voor de vierbaksduwvaart. Qua afmeting en opbouw zijn de sluizen bijna gelijk aan elkaar.

Huidige staat sluiscomplexen.

De sluiscomplexen zijn in de loop van de tijd aangepast. Alleen bij de Prinses Beatrixsluis hebben tot op heden geen aanpassingen plaats gevonden. Door de toenemende scheepvaart en schaalvergroting van de binnenvaart is de maximumcapaciteit bij de Prinses Beatrixsluis bereikt.

Verder wordt er in veel rapporten binnen Rijkswaterstaat van uitgegaan dat de huidige sluisafmetingen bepalend zijn voor de afmetingen van de schepen in de toekomst, met uitzondering van de Prinses Beatrixsluis. Doordat de afmetingen van motorschepen nog altijd beduidend kleiner zijn dan de afmetingen van een vierbaksduwcombinatie kunnen deze

schepen nog verder toenemen tot de maximale toegestane afmetingen die gesteld zijn volgens het Binnenlands Politiereglement Rijnvaart '84 [BPR, 1984].

De Prinses Beatrixsluis wordt in de Nota Mobiliteit genoemd als een capaciteitsknelpunt in de periode 2005-2010. De Intensiteit/Capaciteit (I/C) factor bedroeg hier in 2007 al 0,5. In het algemeen betekent een I/C waarde boven de 0,5 een wachttijd van (meer dan) dertig minuten. Een dergelijke I/C factor geeft een duidelijke indicatie van belemmering voor de doorstroming en van een onbetrouwbare wachttijd, en daardoor een onbetrouwbare reistijd. De andere sluisen hebben een I/C factor die lager is dan 0,5.

In de BPRW 2010-2015 staat vermeld dat een derde sluiscolk bij de Prinses Beatrixsluis, die geschikt is voor vierbaksduwvaart, noodzakelijk is en dat met de start van de bouw van deze sluis voor 2015 begonnen dient te worden. Hiermee wordt de route van Amsterdam naar Rotterdam voor de vierbaksduwvaart aanmerkelijk sneller. Ook RWS-Dienst Verkeer en Scheepvaart (DVS) adviseert uit oogpunt van een vlotte en veilige verkeersafwikkeling bij sluisen om bij een I/C factor van 0,5 á 0,6 extra sluiscapaciteit te realiseren. Hiermee wordt in de toekomst een vlotte verkeersafwikkeling gewaarborgd. De laatste tien jaar is er een sterke toename waargenomen van vervoerde goederen tussen de Amsterdam-Rotterdam-Antwerpenhavens (ARA-havens). Het gaat hier om de goederen die door de binnenvaart verscheept worden. [Wolters, 2001], [DVS, 2008].

3.2 Basis- en Gebruiksfuncties

In deze paragraaf zullen de basis- en gebruiksfuncties verder uitgewerkt worden, daarbij lettend op de volgende punten: veiligheid, waterhuishouding, recreatie en ecologie (toegesplitst op natuurvriendelijke oevers).

Zoals eerder beschreven is het Amsterdam-Rijnkanaal in handen van het rijk en valt daardoor onder de rijkswateren. De rijkswateren zijn volgens het Beheers en Ontwikkelplan voor Rijkswateren [BPRW 2010-2015] in te delen in verschillende functiegroepen, namelijk:

1. *Basisfuncties: veiligheid, voldoende, schoon en (ecologisch) gezond water;*
2. *Scheepvaart: vlot, betrouwbaar en veilig verkeer over water (voor alle verkeersdeelnemers);*
3. *Gebruiksfuncties: drinkwater, recreatie, visserij en zwemwater.*

Een groot gedeelte van het beheer is gericht op de instandhouding van de basisfuncties en de bijbehorende infrastructuur. Als de basisfuncties op orde zijn, ontstaan ook gunstige condities voor de overige gebruiksfuncties. In deze paragraaf zullen de basis en gebruiksfuncties beschreven worden. De functiegroep scheepvaart wordt apart behandeld in paragraaf 3.3.

3.2.1 Veiligheid tegen overstromen

Nederland kent een uitgebreid stelsel van zogenaamde primaire en secundaire waterkeringen. De primaire waterkeringen bieden bescherming tegen overstromingen vanuit zee, de Waddenzee, de grote rivieren Rijn, Maas, Westerschelde, Oosterschelde en het IJsselmeer. Daarbij gaat het vooral om die gebieden, waar eventuele overstromingen veel slachtoffers of economische schade tot gevolg hebben.

Onderverdeling primaire waterkering

- a. Waterkeringen uit de categorie a, ook wel a-keringen genoemd, zijn dijken, duinen en kunstwerken die rechtstreeks bescherming bieden tegen de zee, de grote rivieren, het IJsselmeer of het Markermeer.
- b. Waterkeringen uit de categorie b, ook wel b-keringen genoemd, zoals de Afsluitdijk of de Maeslantkering, verbinden waterkeringen uit de categorie a of uit categorie c.
- c. Waterkeringen uit de categorie c, c-keringen, zijn waterkeringen die indirect tegen buitenwater beschermen. Een voorbeeld hiervan zijn de waterkeringen langs het Noordzeekanaal.

Veiligheid garanderen

Primaire waterkeringen moeten een bepaalde waterstand kunnen keren die gemiddeld één keer in de 500 tot 10.000 jaar voorkomt. Niet elke waterkering/dijkkring heeft dezelfde norm. Deze normen zijn vastgesteld in de Wet op de Waterkering.

Deze veiligheid wordt niet alleen gegarandeerd door bijvoorbeeld het boven hoogwater gelegen deel van de waterkering. Ook een vooroever, bodembescherming, havendam en/of een duinachtig gebied, draagt bij aan de stabiliteit van een waterkering.

Bouwen bij/op waterkeringen

Op dijken en duinen, die de eerste bescherming tegen overstromingen vormen, is het in principe verboden te bouwen, bestaande gebouwen uit te breiden of van functie te veranderen. Een waterkering moet immers voor de veiligheid altijd aangepast kunnen worden aan de stijgende zeespiegel en een zwaardere golfaanval zonder dat bebouwing in de weg staat. In bepaalde gevallen kan ontheffing worden gegeven.

Behoefteligger

Niet alleen om de functie en stabiliteit van de waterkering te garanderen, maar ook om in te spelen op ontwikkelingen als een stijgende zeespiegel en mogelijk dijkverzwaringen en de behoefte vanuit de samenleving om medegebruik van de waterkeringen, is het vaststellen van een legger wenselijk. De legger wordt ook gebruikt bij de toetsing op veiligheid van de waterkering één keer per vijf jaar.

Het volgende tekstgedeelte is uit de legger voor het Amsterdam-Rijnkanaal. [Legger Amsterdam-Rijnkanaal en Lekkanaal, 2009]

De Westelijke kanaaldijk van het Amsterdam-Rijnkanaal is een primaire kering categorie c. Dat betekent dat de dijk indirect het rivierwater van de Lek keert. Als de Lekdijk bezwijkt dan moet de Westelijke kanaaldijk het water tegenhouden. Bezwijkt deze ook dan zal dat voor veel wateroverlast in het oostelijk deel van het Groene Hart zorgen.

De Westelijke kanaaldijk is onderdeel van verschillende dijkkringen waaronder Dijkkring 14 die de een overstromingskans heeft van één keer in de 10.000 jaar.

De Westelijke kanaaldijk is recentelijk getoetst aan de hand van een legger, hierin komt naar voren dat de dijk niet voldoet aan de gestelde eisen want:

- Dijk te laag;
- Damwandconstructie instabiel;
- Pijpleidingen in dijklichaam.

De dijk is over het algemeen te laag. Een gemiddelde ophoging met ongeveer 1,0 meter is nodig.

Opmerkelijk is dat bij het toetsen van de dijk ervan uitgegaan wordt dat de oeverconstructie, dus de damwanden voldoen. Bij het toetsen van de dijk is niet gekeken naar de stabiliteit van de damwandconstructie. De damwandconstructie voldoet niet, dit wordt verder onderzocht bij de Dienst Utrecht. Bij dit onderzoek wordt ervan uitgegaan dat de dijk wel voldoet, wel wordt er in de aanbevelingen van het rapport [Arcadis, 2009] een opmerking geplaatst dat volgens bronnen binnen Arcadis in de toekomst wellicht aanpassingen aan de dijk noodzakelijk zijn. Dit is niet meegenomen in het onderzoek maar kan wellicht invloed hebben op de krachtsverdeling van de damwand.

Wanneer dijkherstel en oeverreconstructie samengevoegd worden is het misschien mogelijk om gelijktijdig de waterkering te verhogen en een natuurvriendelijke oever te realiseren.

In een primaire waterkering mogen geen obstakels aanwezig zijn. In de Westelijke kanaaldijk is dat helaas wel het geval. In de dijk zijn verschillende leidingen aanwezig, waaronder de waterleiding voor de drinkwaterinname. Deze leiding loopt vanaf Nieuwegein tot aan Amsterdam en heeft een diameter van 1,00 meter en een druk van 8 tot 16 bar. In de dijk loopt ook een leiding voor stadsverwarming, deze heeft ook een grote diameter. Defensie heeft ook leidingen in de dijk en deze hebben een werkdruk van 80 bar. Met de eigenaars van deze leidingen zijn afspraken gemaakt om de leidingen te monitoren om het falen van de dijk door een lek in de leiding tegen te gaan.

Vanuit de legger is voor de Westelijke kanaaldijk een dijkhoogte bepaald. Een tabel hiervan is te vinden in bijlage 4, ook is in bijlage 4 een voorbeeldprofiel te zien van de Westelijke kanaaldijk die voldoet aan het leggerprofiel.

De afmetingen van het dijklichaam moeten volgens de wet op primaire waterkeringen bepaald worden. Dit hangt af per sectie, de Westelijke kanaaldijk is opgedeeld in verschillende secties waardoor er ook verschillende randvoorwaarden per sectie zijn.

De Oostelijke kanaaldijk heeft een overschrijdingskans die beduidend lager ligt dan de Westelijke kanaaldijk. Deze overschrijdingskans is 1/1250 jaar. In deze dijk liggen ook niet zoveel leidingen als in de Westelijke kanaaldijk. Aanpassingen aan de Oostelijke kanaaldijk zijn gemakkelijker dan aan de Westelijke kanaaldijk, dit komt door de lagere eis die geldt voor deze dijk.

3.2.2 Waterhuishouding

De waterspiegel ligt gemiddeld op NAP -0,40 meter; op het Noordelijke pand kan deze waterstand ongeveer +/- 0,20 m variëren. Bij hogere waterstanden zullen dijken in de buurt van Amsterdam overstromen. Dit in verband met de lage waterkerende voorzieningen ten oosten van Amsterdam. De bodem van het kanaal ligt op een diepte van NAP -6,40 meter. De breedte op de waterlijn varieert tussen de 70 en 120 meter.

In het Betuwepand is de gemiddelde waterstand NAP +3,00 meter, hierdoor komt de gemiddelde waterdiepte op het kanaal op 6,85 meter. Schommelingen op het Betuwepand komen door de variatie in waterstanden op de Lek, de Lek kruist het kanaal en staat daardoor direct in verbinding met het Betuwepand.

Het Amsterdam-Rijnkanaal is ook belangrijk voor de waterhuishouding in West-Nederland. De sluizen in het Amsterdam-Rijnkanaal hebben als nevenfunctie het in- en/of uitlaten van water. In tijden van droogte kan dus zoet water ingelaten worden. Wanneer sprake is van een wateroverschot kan het kanaal als spuikanaal fungeren. Uiteraard hangt de spuicapaciteit af van de waterstanden en de doorlaatopeningen in de sluiscomplexen. Per jaar wordt er circa één

miljard kubieke meter water gespuid via de spuisluizen in IJmuiden die lozen op zee. Hiervoor is een groot pompvermogen geïnstalleerd in het sluiscomplex. De stroomsnelheden (0,06 m/s) die optreden bij het spuien van het water zijn niet merkbaar in het Amsterdam-Rijnkanaal en kunnen verwaarloosd worden. Wanneer er extreme waterstanden optreden, zoals bij de hoge rivierafvoeren in 1993 en 1995, zal het scheepvaartverkeer stilgelegd worden. Normaal kent het kanaalpeil geen grote peilschommelingen.

In het kanaal zijn twee drinkwaterinname punten. Rondom deze punten is de waterkwaliteit belangrijk. Om de waterkwaliteit op het gewenste niveau te houden, is een beschermingszone ingesteld die rondom het inname punt ligt. Het drinkwater wordt via grote buizen, die in de Westelijke kanaaldijk liggen, getransporteerd naar de duinen waar het gefilterd wordt, waarna het naar Amsterdam en omgeving gedistribueerd wordt. De industrie gebruikt het kanaalwater ook voor verschillende processen, onder andere als koelwater.

De waterhuishouding is van belang om zoute kwel vanuit zee tegen te gaan in de diepste polders ten westen van het Amsterdam-Rijnkanaal. Om dit ongewenste proces tegen te gaan wordt zoet water vanuit het Amsterdam-Rijnkanaal in de polders ingelaten. Vooral ten noorden van Utrecht is het van belang om zoute kwel tegen te gaan. Dit om kwekers en tuinders het gebruik van zoet water te garanderen. Het maaiveld achter de dijk ligt veel lager dan het waterpeil in het kanaal, dit kan problemen opleveren voor de omgeving in de vorm van wellen die in het achterland voor kunnen komen.

De verwachting is dat problemen optreden door verdieping van het kanaal waarbij grondlagen doorsneden worden waardoor de kwel groter wordt in omliggende polders.

3.2.3 Recreatie

Wanneer er gesproken wordt over recreatie in combinatie met kanalen of grote waterlopen wordt door veel mensen gelijk gedacht aan de recreatievaart. Dit is echter te beperkt, want rondom water kunnen verschillende recreatieve activiteiten ontplooid worden.

Als er over recreatievaart op het Amsterdam-Rijnkanaal gesproken wordt, stuit dit meestal op verzet bij Rijkswaterstaat en de belangenvereniging voor de binnenvaart. Het Amsterdam-Rijnkanaal wordt gezien als een hoofdtransportas. De recreatievaart op een dergelijke hoofdtransportas wordt als hinderlijk en onveilig ervaren. Voor de recreatievaart zijn er verschillende alternatieve routes, zoals via het Merwedekanaal en de Vecht. Grote jachten zien het kanaal niet als hinderlijk en zullen dan ook vaker het Amsterdam-Rijnkanaal nemen. De grote jachten hebben ook minder last van de hinderlijke golfoploop die op het Amsterdam-Rijnkanaal ontstaat.

Hieronder staat een opsomming van verschillende recreatieve activiteiten in relatie met het Amsterdam-Rijnkanaal:

- Grote Rijnschepen die als 'riviercruise' tot aan Zwitserland varen;
- Wandelaars over promenade/fiets/voetpad langs het water;
- Wandelaars langs natuurvriendelijke oevers over bv. een 'knuppelpad';
- Recreatie vissers, hengelsport;
- Recreatievaart op het kanaal.

De bovenstaande punten vormen een lijst van recreatieve activiteiten. Hieronder zullen enkele punten verder uitgewerkt worden.

Op het Amsterdam-Rijnkanaal varen vooral in de zomermaanden veel riviercruiseschepen. Veel van deze schepen varen de stad Utrecht voorbij, omdat er weinig tot geen voorzieningen zijn om

op een 'riviercruisewaardige' manier van boord te gaan, en de mogelijkheden om via een mooie route in de binnenstad te komen zijn beperkt. Wel zijn er cruiseschepen die aanleggen bij de 'probleemwijk' Kanaleneiland vanwaar de bezoekers van de cruiseschepen met bussen naar het centrum vervoerd worden.

Mensen trekken altijd naar water, dit is de 'kleinere' recreatie waaronder activiteiten vallen als wandelen, fietsen, paardensport, hond uitlaten, vissen of eventueel skaten.

Natuurvriendelijke oevers geven wandelaars de beleving dat ze in een stukje natuur lopen. Een natuurvriendelijke oever langs een kanaal is voor vogels een interessante plek om te fourageren of om te nestelen. Dit trekt weer vogelaars aan. Deze verschillende belangen geven een meerwaarde van het kanaal, en het geeft meerdere functies aan een kanaal.

Aanliggende fietspaden vervullen ook een rol doordat er een mooie fietsroute gecreëerd wordt langs het kanaal tussen de grote steden. Vooral de continuïteit van de fietspaden wordt gewaardeerd door fietsers. Men kan dan lange afstanden langs het kanaal fietsen. Op dit moment is er niet overal langs het kanaal een fietsverbinding, op veel plaatsen wordt het fietspad onderbroken door bedrijfsterreinen, of andere obstakels die als hinderlijk worden ervaren door fietser.

Rijkswaterstaat ziet het niet als zijn taak om de fietspaden aan te leggen langs het kanaal. Wel worden onderhoudswegen aangelegd. Deze onderhoudswegen zijn niet altijd geschikt als fietspad. Door de recreanten worden deze onderhoudswegen wel als fietspad gebruikt, en er wordt door de recreanten geklaagd over de slechte kwaliteit van het wegdek. Ook de continuïteit van de fietspaden langs het kanaal laten te wensen over. Rijkswaterstaat krijgt geen geld voor de aanleg van fietspaden omdat dit niet binnen hun takenpakket valt.

In het Uitvoeringsplan Oevers Amsterdam-Rijnkanaal staan veel projecten die een overlap met elkaar hebben. Opvallend is dat er binnen deze projecten veel ruimte is om recreatie te bevorderen in samenspraak met andere projecten. De Gemeente Utrecht pakt de groene zones en langsverbindingen langs het Amsterdam-Rijnkanaal aan. Met de ontwikkeling van stadsdeel Leidsche Rijn krijgt het kanaal een meer centrale rol binnen de stad Utrecht. Met diverse groen- en recreatieontwikkelingen aan weerszijden van het kanaal wordt de verbondenheid van beide oevers benadrukt. De oostoever krijgt daarbij een recreatieve rol en de westoever een meer ecologische rol toebedeeld.

Een onderdeel van dit project is de herinrichting van de oevers van Kanaleneiland. Ter hoogte van Kanaleneiland zijn de damwanden aan de oostzijde over een aantal kilometers aan vervanging toe. Aan de westzijde wil de Gemeente Utrecht een natuurvriendelijke oever realiseren. Bij vervanging van de damwand kan afstemming met de herinrichtingwerkzaamheden van de boulevard, in het kader van het Groenstructuurplan 2007, gezocht worden.

Sportvisserij is ook een groep die veel gebruik maakt van het Amsterdam-Rijnkanaal. Deze groep pleit voor het verwijderen van damwandoevers en de gietasfalt oevers en het plaatsen van breuksteen oevers in verband met paai en beschermgebieden voor de jonge vis. Een beter en ecologisch waardevollere oever is een natuurlijke oever.

In verschillende zijkanalen zijn door verdwijning van industrieterreinen, of door verbreding van zijkanalen, woonwijken aan het water gerealiseerd. Deze huizen, meestal met een aanlegsteiger, zijn een impuls om zo wonen aan het water te stimuleren en gebruik te maken van oude waterlopen of zijkanalen die grenzen aan het Amsterdam-Rijnkanaal.

3.2.4 Ecologie

De ecologie in en rondom het Amsterdam-Rijnkanaal wordt in dit rapport beperkt tot algemene zaken, zoals een natuurvriendelijke oever in combinatie met de kwaliteit van de huidige oever die niet natuurvriendelijk is. De ecologie die besproken wordt is veelal van belang voor een juiste keuze van een nieuw te ontwerpen oeverconstructie.

Langs het Amsterdam-Rijnkanaal is op beperkte schaal gebruik gemaakt van natuurvriendelijke oevers. Op de plaats waar de Maurikse Wetering uitkomt in het Amsterdam-Rijnkanaal is een natuurvriendelijke oever gemaakt. Natuurvriendelijke oevers kunnen dienst doen als paai- en opgroeiplaats. Langs het Amsterdam-Rijnkanaal zijn fauna uittrede plaatsen gerealiseerd, om de barrièrewerking in dwarsrichting te verminderen. Hoewel de omstandigheden niet ideaal zijn, blijven er toch mogelijkheden voor natuurvriendelijke oevers in het Amsterdam-Rijnkanaal.



Figuur 3-3: Natuurvriendelijke oever t.p.v. Maurikse Wetering langs Amsterdam-Rijnkanaal.

In figuur 3-3 is een natuurvriendelijke oever te zien bij de Maurikse Wetering in het Amsterdam-Rijnkanaal. Op deze foto's is duidelijk de breuksteen te zien die scheepsgolven moet dempen om de natuur te beschermen.

In het verleden heeft RWS Utrecht een streefbeeld opgezet voor natuurvriendelijke oevers voor het Amsterdam-Rijnkanaal. In dit streefbeeld is opgenomen dat er 60 ha natuurvriendelijke oever aangelegd zal worden (voor 2010) langs of bij het Amsterdam-Rijnkanaal. Na enkele jaren is gebleken dat deze ambitie veel te hoog was. Op dit moment ligt het ambitieniveau beduidend lager. Wel wordt in de zijwateren van het Amsterdam-Rijnkanaal veel geïnvesteerd in natuurvriendelijke oevers. Deze wateren vallen vaak niet onder de Rijkswateren maar onder bijvoorbeeld Provincie en Waterschappen. Langs het Amsterdam-Rijnkanaal worden op verschillende plaatsen studies gedaan zoals 'Realisatie natuurvriendelijke oever Nigtevecht-west', een plan van 12 ha overgangsgebied van water en land.

Kanaaloevers vervullen op dit moment weinig functies voor planten en dieren. Door hun niet-natuurlijke ontstaansgeschiedenis doorsnijden kanalen verschillende bodem-, natuur- en landschapstypen. Hierdoor zijn het belangrijke schakels in het koppelen van verschillende ecologische gebieden. In de omgeving van kanalen is dan ook een grote variatie in het achterland terug te vinden. Juist door het doorsnijden van verschillende landschapstypen bestaan mogelijkheden voor natuurvriendelijke oevers langs kanalen. Tevens kunnen zij door hun langgerekte vorm een prima verbinding vormen tussen verschillende natuurgebieden in Nederland en zo bijdragen aan de Ecologische Hoofd Structuur (EHS).

Wanneer aan beide zijden van het kanaal op dezelfde plaats een natuurvriendelijke oever ligt, zal dit een dwarsbarrière wegnemen. Dieren kunnen zo het kanaal oversteken. Op deze manier kan de versnippering van natuurgebieden tegengegaan worden. Daardoor zullen de natuurgebieden aan beide zijden van het kanaal weer met elkaar in verbinding staan.

Natuur en kanalen lijken op het eerste gezicht moeilijk samen te gaan. Toch zijn tal van mogelijkheden te realiseren, vooral aan de oevers. Enkele belangrijke redenen om natuurvriendelijke oevers aan te leggen zijn:

- Door aanleg van natuurvriendelijke oevers bestaat de mogelijkheid dat de ecologische toestand van het Amsterdam-Rijnkanaal zal verbeteren en tegelijkertijd de barrièrewerking binnen de EHS zal verminderen. Hiervoor is het niet persé noodzakelijk omvangrijke natuurvriendelijke oevers aan te leggen, compleet met vooroeververdediging en achterliggende natte zone.
- Vervanging van damwand door bestorte taludoevers (taludoever niet steiler dan 1:3 ten behoeve van uittreedbaarheid voor fauna) leidt al tot een aanzienlijke verbetering van het ecologisch functioneren van het Amsterdam-Rijnkanaal. Voorwaarde is wel dat de taludoevers doorgroeibaar zijn met riet en andere oeverplanten die weinig gevoelig zijn voor golfslag en sterke stromingen (ten gevolge van de scheepvaart).

De hoge verkeersintensiteit en de hoge verkeersbelasting op het Amsterdam-Rijnkanaal zal het aanleggen van natuurvriendelijke oevers beïnvloeden.

In het verleden zijn al verschillende ontwerpen uitgevoerd. Bijvoorbeeld een proef met drijvende



buizen aan de damwandconstructie waarin oeverplanten kunnen groeien. Door de golfbelasting is de constructie kapot geslagen en ten slotte verwijderd. De hoofdoorzaak van het falen van deze constructie was het onderschatten van de golfbelasting op de constructie, waardoor de verbindingstukken kapotgeslagen zijn.

Figuur 3-4: Natuurvriendelijke oever met golfbreker. [Cur 201, 1998]

Er zijn langs het Amsterdam-Rijnkanaal mogelijkheden om een natuurvriendelijke oever aan te leggen maar er moet wel rekening gehouden te worden met de hoge belastingen op de oeverconstructie. In figuur 3-4 is te zien dat de golfbreker de natuurvriendelijke oever beschermt tegen golfbelastingen.

Gebruikers

Omdat door stedelijke uitbreiding het Amsterdam-Rijnkanaal, op sommige plaatsen in stedelijk gebied is komen te liggen, zal er rekening gehouden moeten worden met mensen die op de oever recreëren. Het betreft hier de recreatieve functie, maar ook de veiligheid voor de recreanten. Het is belangrijk dat te water geraakte mensen gemakkelijk uit het water kunnen komen. Overal dienen voorzieningen te zijn waar te water geraakte mensen uit het water kunnen komen.

Wanneer oeverreconstructie plaatsvindt of nieuwe recreatieve gebieden worden ontwikkeld aan het water, dan dient met dit aspect rekening gehouden worden in het ontwerp. In de paragraaf recreatie is nader ingegaan op het aspect van recreëren op de oevers.

Er zijn veel gebruikers op het Amsterdam-Rijnkanaal, iedere organisatie heeft zijn eigen belang bij een type oever. De sportvisserij heeft bijvoorbeeld belang bij een goede visstand. Wanneer jonge vissen bescherming vinden in de oever tussen grove breuksteen of een natuurlijke rietoever, zal dit de visstand ten goede komen.

In het Betuwepand liggen veel taludoevers met gepenetreerde stortsteen. De sportvisserij vindt dit type oevers geen goede oplossing, omdat jonge vissen hier geen goede schuilmogelijkheden hebben. Natuurorganisaties vinden de grove breuksteen echter geen goede oplossing voor reeën en groot wild, omdat die met hun poten tussen de breuksteen blijven steken en daardoor botbreuken kunnen oplopen.

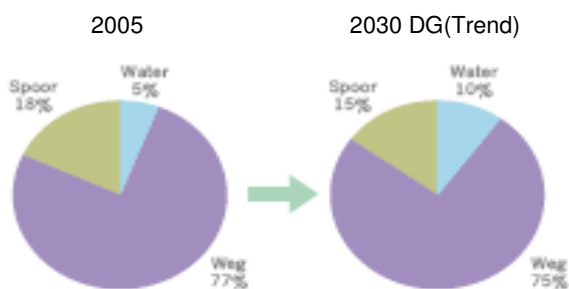
3.3 Scheepvaart

Het Amsterdam-Rijnkanaal is één van de drukst bevaren kanalen van Nederland. Jaarlijks maken circa 100.000 schepen, waaronder circa 90.000 binnenvaartschepen en 10.000 plezierjachten, gebruik van het kanaal.

3.3.1 Algemeen beeld scheepvaart

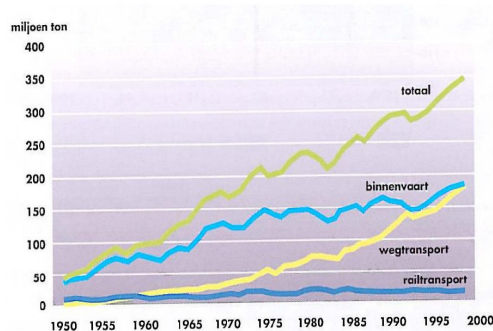
Het Amsterdam-Rijnkanaal neemt in Nederland een belangrijke plaats in voor de binnenvaartverbinding tussen het noorden en zuiden van Nederland. Nederland is een doorvoerland voor de rest van Europa. De binnenvaart heeft naast het vervoer over het spoor en de weg een belangrijke rol. Het vervoer met de binnenvaart is in Nederland veel hoger dan in de rest van Europa. Het goederenvervoer per spoor in Nederland ligt beduidend lager dan in de rest van Europa. De verdelingen zoals voorgesteld in figuur 3-5 geven een beetje vertekenend beeld voor Nederland. In de figuren mist het aandeel wat verpompt wordt door pijpleidingen. Het aandeel wat door pijpleidingen verpompt wordt is in Nederland zelfs hoger dan het aandeel wat de spoorlijnen leveren.

In figuur 3-5 is duidelijk te zien dat er in 2030 een verdubbeling plaatsvindt in het vervoer over water.



Figuur 3-5: Verdeling goederenvervoer in Europa.
[Waardevol transport, 2007]

De grafiek 3-6 die is ontleend uit 'goederen vervoer in Nederland' geschreven door De Vries. Hierin is te zien welke plaats binnenvaart inneemt en ingenomen heeft in de laatste jaren.



Figuur 3-6: Plaats binnenvaart in de transportsector.

3.3.2 Grootste toegelaten schepen op Amsterdam-Rijnkanaal

Het Amsterdam-Rijnkanaal is geschikt voor de maximale afmetingen van schepen die geclassificeerd zijn volgens CEMT-klasse VIb, zie bijlage 2. Rijkswaterstaat hanteert zelf ook nog een andere classificatie deze classificatie wordt aangeduid met hoofdletter M en een getal.

In de tabel 3-1 is aangegeven welke maximale afmetingen toegestaan zijn volgens het Binnenvaart Politie Reglement [BPR '84]. Dit reglement wijkt af van de CEMT-classificering en geeft een extra onderverdeling aan. Ruwweg kan gezegd worden dat het BPR '84 de maten heeft afgerond. Ook wordt in de BPR de maximale toegestane snelheid genoemd deze is voor het Amsterdam-Rijnkanaal 18 km/uur.

Bron		Lengte [m]	Breedte [m]	Diepgang [m]	Doorvaart hoogte [m]
CEMT VIb		196	22,80	4,00	9,10
BPR '84	Schepen met gekoppeld verband	150	23,00	4,00	-
BPR '84	Duwstellen en slepen	200	23,00	4,00	-

Tabel 3-1: Maximale scheepsafmetingen Amsterdam-Rijnkanaal.

Bij de BPR '84 zijn de scheepstypen al verder uitgesplitst. Voor de duwstellen is een 6400-12000 ton duwkonvooi bestaande uit 2 x 2 bakken het maximale schip, voor schepen met een gekoppeld verband of motorschepen ligt het tonnage tussen de 3000-9000 ton. Uiteraard varen er ook kleinere schepen over het kanaal. Schepen groter dan de maximale afmetingen kunnen een ontheffing aanvragen om van het kanaal gebruik te mogen maken. Dit betreft schepen of koppelverbanden groter dan bovenstaande afmetingen of speciaal transport.

In huidige bestekken/berekeningen voor het Amsterdam-Rijnkanaal worden de volgende vermogens aangehouden: motorschepen met twee maal een hoofdschroefvermogen van 1000 kW en een boegschroefvermogen van 450 kW. Dit is een standaard ontwerpschip waarmee gerekend wordt. Natuurlijk varen er ook schepen met andere vermogens op het kanaal.

3.3.3 Aantal schepen door de jaren heen

In [Baars,1991] staat de volgende tabel met aantallen van de scheepvaart door de jaren heen. Het aantal schepen is voor en na de tweede wereldoorlog ongeveer gelijk gebleven maar het tonnage en afmetingen van de schepen is steeds verder toegenomen.

Jaar	Gem. scheepsgrootte Binnenlandsevaart (ton)	Gem. scheepsgrootte Rijnvaart (ton)	Gepasseerde schepen Noord en Zuid
1893	83	300	28.645
1902	94	452	48.521
1912	132	660	61.296
1922	164	730	68.909
1932	186	771	80.886
1937	216	707	74.876
1942	**	**	44.580
1945	260	**	26.036
1952	300	710	84.401
1960	**	**	**
1965	460	460	109.100
1970	**	**	95.850
1975	**	**	101.384
1980	**	**	96.528
1985	900	**	89.100
1990	1000	1000	97.000
1991	1020	1020	100.000
2002*	1.043	**	**
2003*	1.083	**	**

Tabel 3-2: Gegevens vervoerstromen in het verleden. [Baars,1991]

*Cijfers ontleend aan AVV publicatie

**Geen gegevens bekend

Op verschillende punten wordt de scheepvaart gevolgd door het IVS'90 systeem. Dit geeft voor de sluiselpunten de volgende aantallen schepen, zie tabel 3-3. Ook het vervoerd gewicht is weergegeven in de tabel.

Telpunt naam		2004	2005	2006	2007
Beatrixsluis (Lekkanaal)	Aantal schepen Recreatie en beroepsvaart	59.606	57.072	56.666	55.980
	Vervoerd gewicht (x1000) ton	35.822	37.771	41.948	41.875
Irenesluis (ARK)	Aantal schepen Recreatie en beroepsvaart	38.515	27.506	39.772	38.078
	Vervoerd gewicht (x1000) ton	31.850	21.937	37.029	42.197
Bernardsluis (ARK)	Aantal schepen Recreatie en beroepsvaart	39.456	28.710	40.718	39.702
	Vervoerd gewicht (x1000) ton	32.721	22.440	36.999	42.297
Noordelijke pand (ARK)	Aantal schepen Recreatie en beroepsvaart	98.121	84.578	96.438	94.058
	Vervoerd gewicht (x1000) ton	67.672	59.708	78.977	84.072

Tabel 3-3: Aantal schepen per telpunt. [Dienst Verkeer en Scheepvaart, 2008]

Om een inschatting te maken van het aantal schepen dat over het noordelijke deel van het Amsterdam-Rijnkanaal gaat, kunnen de aantallen van de Prinses Beatrixsluis en de Prinses Irenesluis bij elkaar opgeteld worden. Ter plaatse van de splitsing bij het Lekkanaal is het aantal schepen wat richting de Prinses Irenesluis gaat ongeveer gelijk met het aantal dat via de Prinses Beatrixsluis naar Rotterdam gaat.

Prognose scheepvaartintensiteit

Toekomstige ontwikkelingen zijn moeilijk vast te stellen. Bij het gebruik van modellen die een prognose van de scheepsintensiteit geven is de vraag, welke data is gebruikt om een prognose te bepalen? Bij Rijkswaterstaat dienst Verkeer en Scheepvaart wordt het BinnenVaart Analyse Systeem (BIVAS model) gebruikt om prognoses te geven voor de scheepsintensiteit. Echter in dit model zijn geen duwbakken en klasse VIa schepen gebruikt, terwijl juist deze schepen van belang zijn in dit onderzoek. Zodat er op dit moment met dit model geen prognoses voor de grootste schepen uit de binnenvaartvloot zijn, terwijl door de schaalvergroting de kleinere schepen vervangen worden door de grote schepen.



Figuur 3-7: Aanvoer nieuwbouwschepen in West-Europa vanuit China.

Ook is een eventuele aanpassing in het vaarwegennet niet meegenomen in het BIVAS model, zoals de aanleg van een nieuwe sluis bij de Prinses Beatrixsluis, en het beschikbaar maken van het bijbehorende Lekkanaal voor grotere schepen. Ook hierdoor kan het BIVAS model geen prognose geven voor het Amsterdam-Rijkkanaal.

In West-Europa zijn de laatste jaren veel nieuwbouwschepen in de vaart genomen. Hierdoor is de West-Europese binnenvaartvloot de modernste in de wereld. In figuur 3-7 is de aanvoer van casco's van binnenvaartschepen uit China te zien.

3.3.4 Ontwikkeling in binnenvaart

De bouw van nieuwe schepen en het vergroten van de schepen hangt nauw samen. Schaalvergroting is vooral de laatste jaren sterk toegenomen. Schaalvergroting zegt iets over het vergroten van de schepen en niet over de verkeersintensiteit op het kanaal. Door de schaalvergroting is een stijging te zien in vervoerde tonnen, maar een daling in het aantal schepen.

Omdat deze trend belangrijk is voor het nieuw te ontwikkelen dwarsprofiel, is het van belang dat de gevolgen die de schaalvergroting heeft op het kanaalprofiel bekend zijn.

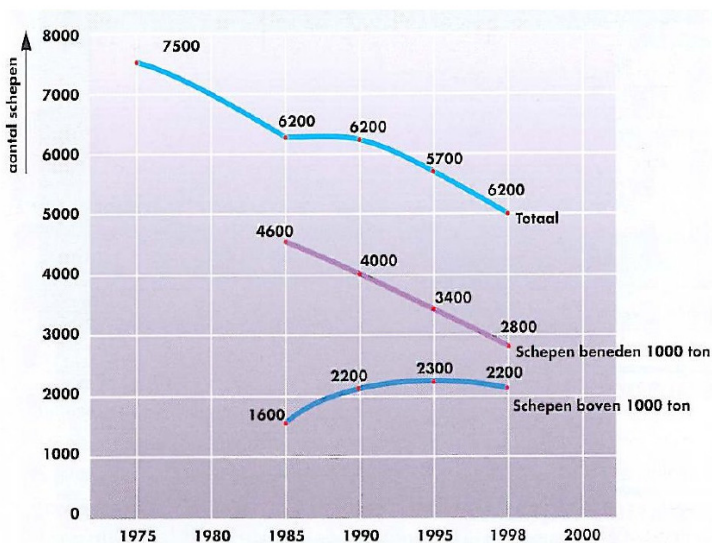
3.3.5 Schaalvergroting scheepvaart

Aan de hand van het rapport [Alkyon,2005] worden enkele hoofdpunten samengevat: Met het begrip schaalvergroting wordt bedoeld dat men steeds meer grotere schepen op bestaande vaarwegen ziet. Op kanalen ziet men vaak dat de grootste schepen niet groter worden, omdat de afmetingen afgestemd zijn op de maximaal toegelaten afmetingen die 'opgelegd' zijn door bijvoorbeeld sluisen. De schaalvergroting houdt dan in dat het aantal kleine schepen in de vloot

afneemt en vervangen wordt door schepen die passend zijn in het traject waar gevaren wordt. Op de hoofdtransport-assen wordt de schaalvergroting van motorschepen nog niet of nauwelijks geremd door kunstwerken.

De genoemde ontwikkelingen kunnen invloed hebben op onderdelen van het vaarwegennet.

In de volgende figuur 3-8 is het aantal schepen in de binnenvaart weergegeven, waarin duidelijk de afname te zien is van het aantal schepen beneden de 1000 ton en een toename van schepen boven de 1000 ton. In totaal zijn er dan minder schepen, maar is er wel een stijging in het laadvermogen.



Figuur 3-8: Ontwikkeling scheepvaart.*

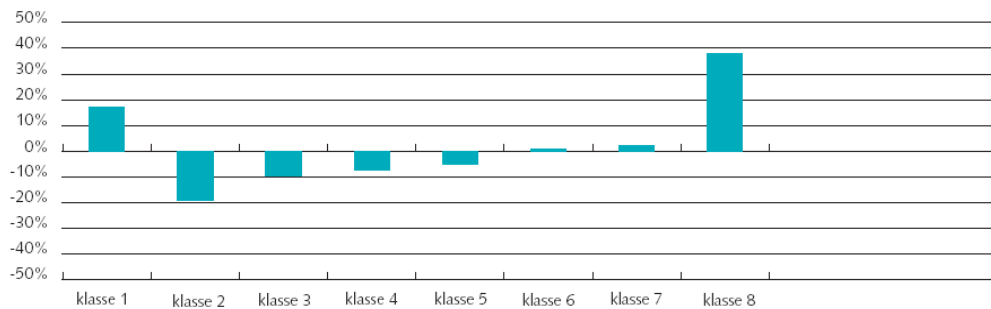
*) Totaal bij 1998 moet 5200 zijn i.p.v. 6200 (ontleend uit publicatie van De Vries)

De [AVV publicatie, 2003] verschaft informatie over de ontwikkelingen tot 2003, zie tabel 3-4.

	1995	2000	2001	2002	2003
Aantal motorvrachtschepen	4.036	3.167	3.148	3.042	2.984
Totaal laadvermogen van deze vloot (x 1000 ton)	3.470	3.119	3.114	3.172	3.231
Gemiddeld laadvermogen (ton)	860	985	989	1.043	1.083

Tabel 3-4: Kengetallen vloot 1995-2003

Hieruit blijkt dat de schaalvergroting na 2000 ook nog is doorgedaan, het aantal motorschepen nam tussen 1995 en 2003 met ca. 25% af, terwijl het totale laadvermogen nauwelijks afnam. Het gemiddeld laadvermogen nam zelfs toe van 860 tot 1083 ton (toename van 26%).



Figuur 3-9: Ontwikkeling laadvermogen

In figuur 3-9 is te zien dat de vergroting in het laadvermogen in 2004 tot 2007 nog steeds doorzet, de figuur is ontleend aan [DVS, 2008]. Om een beeld te krijgen van het laadvermogen:

- Klasse 6 zit tussen de 1500 en 2000 ton;
- Klasse 7 zijn schepen tussen de 2000 en 3000 ton;
- Klasse 8 zijn schepen groter dan 3000 ton.

Een goede vergelijking tussen alle data van gemiddeld laadvermogen en aantallen schepen is niet mogelijk omdat er zoveel verschillen in de data aanwezig is. De reden hiervan is dat de gegevens gefilterd worden. Sommige grafiekmakers halen bv. alle vissersschepen eruit of de bruine vloot, of alle niet beroepsvaart. Hier kunnen verschillende onderverdelingen gemaakt worden, vaak worden deze filters niet vermeld zodat niet te achterhalen is op welke data de tabellen of grafieken gemaakt zijn. Dit is voor dit rapport ook niet van belang omdat hiervoor de trend belangrijk is en deze komt uit alle data duidelijk naar voren.

Voor effecten op de vaarweg is het motorvermogen even belangrijk als de scheepsafmetingen. Daarom is het van belang dat deze gegevens bekend zijn. Ook worden bijna alle nieuwbouwschepen uitgerust met een boegschroef. Het vermogen van de boegschroef blijft nog steeds toenemen. In de literatuur worden de vermogens vaak uitgedrukt in kW terwijl de schippers en scheepsbouwers het vaak over pk hebben. Eén pk is gelijk aan 0,74 kW.

In het rapport [Alkyon, 2005] wordt in het tweede hoofdstuk een samenvatting gegeven over de schaalvergroting. Enkele punten uit deze samenvatting:

- Van 1950 tot 1998: het aantal schepen is met ca. 25% afgenomen maar het totaal laadvermogen bleef ongeveer gelijk. Het gemiddeld laadvermogen nam sterk toe tot boven de 1000 ton.
- Van 1993 tot 2003 ging het gemiddelde laadvermogen van 860 ton naar 1083 ton. Het aantal schepen met vermogens tot 500 kW nam sterk af, maar in de vermogensklasse boven de 750 kW nam het aantal schepen ook na 2000 toe. In 2003 voeren al meer dan 375 schepen met meer dan 1000 kW voortstuwingsvermogen; 100 schepen hadden zelfs meer dan 1500 kW.
- Van 2000 naar 2004 blijkt (voor de selectie >111x11,45 m):
 - a. De gemiddelde lengte (132 m) nauwelijks verder toe te nemen;
 - b. De gemiddelde breedte toe te nemen van 12,50 naar 13,05 m. Het maximum ligt op 17 m;
 - c. De gemiddelde (maximale) diepgang toe te nemen van 3,20 m naar 3,50 m;
 - d. Het vermogen van de voorstuwingslicht toe te nemen tot ongeveer 1900 kW;
 - e. Het vermogen van de boegschroeven blijkt nog iets toe te nemen tot 660 kW;

- De gemiddelde motorvermogens (voorstuwer en boegschroef) zullen nog toenemen. Hoe groot de toename zal zijn is nog niet duidelijk;
- Sommige schepen worden uitgerust met 'hekschroeven' (vergelijkbaar met boegschroeven) om nog beter manoeuvreerbaar te zijn.

Het rapport [Marin, 2008] bespreekt de beschikbare nieuwbouwgegevens over de jaren 2004 tot en met 2007. In deze jaren zijn alle schepen geselecteerd die tot de klassen M8, M9 en M10 behoren. Overige klassen zoals koppelverbanden, duwbakken en kleinere motorschepen zijn niet in de analyse betrokken. De resultaten voor het geïnstalleerde motorvermogen en het geïnstalleerde boegschroefvermogen staan in de tabellen 3-5 en 3-6. In de tabellen is tevens het aantal schepen vermeld dat gebruikt is voor bepaling van het gemiddelde, minimum, maximum en de standaarddeviatie. Schepen waarvan de beschikbaarheid van een boegschroef of het boegschroefvermogen niet vermeld was, zijn niet in de analyse van de boegschroefvermogens betrokken.

RWS/CBS Klasse	Karakterisering	Aantal	Gem [kW]	Min [kW]	Max [kW]	SD [kW]
M8	Groot Rijnschip	211	1256	299	2352	239
M9	Verlengd Groot Rijnschip	47	1688	1250	2206	224
M10	Rijnmax Schip	62	1865	1103	2982	491

Tabel 3-5: Geïnstalleerd hoofdvermogen per RWS/CBS-Klasse in nieuwbouwschepen

RWS/CBS Klasse	Karakterisering	Aantal	Gem [kW]	Min [kW]	Max [kW]	SD [kW]
M8	Groot Rijnschip	156	402	220	856	100
M9	Verlengd Groot Rijnschip	36	588	250	957	193
M10	Rijnmax Schip	53	690	265	1324	253

Tabel 3-6: Geïnstalleerd boegschroefvermogen in nieuwbouwschepen

Uit deze tabellen volgt dat een lichte stijging te zien is in deze categorieën. Het gemiddeld geïnstalleerde boegschroefvermogen in de klasse Groot Rijnschip is 340 kW. Het gemiddeld geïnstalleerde boegschroefvermogen in de klassen Groot Rijnschip, Verlengd Groot Rijnschip en Rijnmax Schip is bij nieuwbouwschepen respectievelijk 402, 588 en 690 kW.

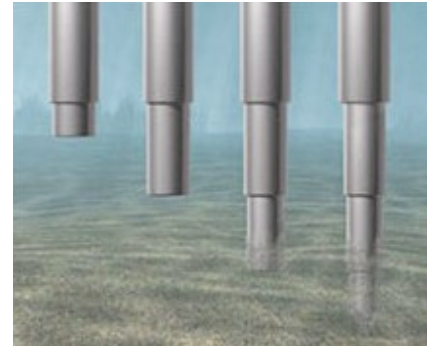
Voor het verdere verloop van de schaalvergroting in de jaren 2008 en 2009 is de databank van binnenvaartschepen geraadpleegd. Hier zijn een aantal nieuwbouwschepen van 2008 bekeken. Vooral in de M10 klasse is te zien dat het motorvermogen nog verder toeneemt met 2 x 1332kW (1800 pk) of 2 x 1258kW (1700 pk). In 2009 is een schip in de vaart genomen met een motorvermogen van 2x 1490kW (2016 pk), het betreft hier een koppelverband.

3.3.6 Spudpalen

In de binnenvaart wordt in toenemende mate gebruik gemaakt van telescopische spudpalen om schepen af te meren [Trouw 06-2009]. Als een schip gaat afmeren voor kortere tijd dan kan het telescopische spudpalen laten zakken, de palen vallen in de bodem en het schip ligt afgemeerd. De palen kunnen afhankelijk van de grootte van het schip op het voor en achterschip aanwezig zijn, de spudpalen zelf zijn niet te zien.

De bodem van het kanaal moet wel zacht zijn anders zakt de paal er niet in. Vooral nieuwe schepen in de binnenvaart worden standaard uitgerust met de spudpalen, maar ook de grotere jachten gebruiken het steeds meer.

Koninklijke Schuttevaer (vereniging voor binnenvaartschippers) adviseert daarom ook om terughoudend te zijn met de aanleg van bodembeschermingen bij damwanden, of het vastleggen van de bodem. Bij een bodembescherming kunnen de schippers de spudpalen niet gebruiken. Ze moeten dan bij het vastleggen aan de kant gewoon trossen gebruiken. Bij een bodembescherming, zoals voor een sluis kunnen de schepen de spudpalen ook niet gebruiken, schippers kunnen het schip gaande houden op het kanaal waarbij ze meer ruimte nodig hebben dan bij gebruik van spudpalen.



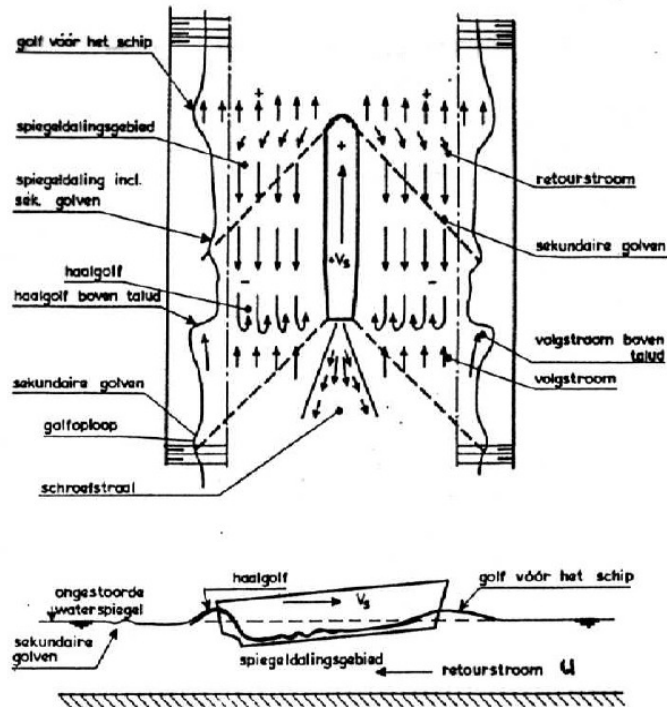
Figuur 3-10: Spudpalen.

Binnen Rijkswaterstaat is men terughoudend om het gebruik van spudpalen toe te staan. Dit in verband met de gevolgen voor bodembescherming, waterafsluitende lagen die door spudpalen doorstoken kunnen worden en andere objecten die op de kanaalbodem liggen.

Bij gebruik van spudpalen in de voorhavens daalt het boegschroef en hoofdschroef gebruik, zo is er minder bodemerrosie in de voorhavens, ook daalt het onderhoud aan remmingwerken omdat de schepen deze dan niet gebruiken. Motoren kunnen dan ook of uitgezet worden of op een veel lager vermogen gezet worden wat weer milieuvriendelijker en duurzamer is. Door het gebruik van spudpalen toe te staan in de voorhavens bij bijvoorbeeld sluisen bestaat de mogelijkheid dat er minder erosie optreedt in de voorhavens en dat de remmingswerken minder belast worden. Hierdoor treedt er een kostenbesparing op voor de beheerder van het kanaal.

3.3.7 Interactie tussen schip en water

Op het Amsterdam-Rijnkanaal is er een hoge verkeersintensiteit, hierdoor is er veel interactie tussen de schepen onderling en tussen de schepen en de kanaaloever. Het gedrag van een schip wordt beïnvloed door de eigenschappen van het kanaal, en het kanaal wordt beïnvloed door de beweging van het schip.



Figuur 3-11: Waterbewegingen. [Verheij, 2008]

Retourstroom

Een schip wat vaart met een bepaalde snelheid verplaatst een hoeveelheid water, door de voorwaartse verplaatsing van het schip zal de boeg van het schip water naar opzij en naar onder verplaatsen. Hierdoor treedt er een stroming op in de tegenovergestelde richting dan de vaarrichting. Dit wordt retourstroom genoemd. De retourstroom hangt af van het natte dwarsoppervlak van het schip en het natte dwarsoppervlak van het kanaal. De retourstroom veroorzaakt een inzinking van het schip. (snellere stroming, hogere U_r , lagere waterstand, volgt direct uit Bernoulli).

De verhouding tussen de diepgang en de kanaaldiepte zijn bepalend voor de bestuurbaarheid van het schip. Het verschil tussen de diepgang en de kanaaldiepte wordt de kielspeling genoemd. De kielspeling bestaat ook weer uit verschillende onderdelen zoals baggertoleranties en maatgevende diepte.

In figuur 3-11 is te zien dat het schip in het midden van de vaarweg vaart. Hierdoor zijn de retourstromen aan beide zijden van het schip gelijk. Hiermee is ook de waterspiegelverlaging gelijk aan beide zijden van het schip. Dit volgt uit de continuïteitsvergelijking en Bernoulli. De methode is gebaseerd op het behoud van energie en is ontwikkeld door Schijf in 1949, en Jansen en Schijf in 1953. Achtergronden en verdere formules zijn te vinden in het collegedictaat [Verheij,2008]. Ook de volgende begrippen komen in [Verheij, 2008] uitgebreid aan de orde

primaire waterbeweging, secundaire waterbeweging, schroefstralen en squat. Voor formules en achtergronden wordt hiernaar verwezen.

Naast de vorm van een vaarweg (bakprofiel of een trapeziumvormig profiel), zijn in dwarsdoorsnede ook de volgende parameters belangrijk: waterdiepte, de vaarwegbreedte op het kielvlak van het varende schip en de bevaarbaarheid van het kanaal. Deze wordt bepaald door de waterdiepteparameter, de breedteparameter hieruit volgt het natte dwarsoppervlak. Deze parameters komen allemaal terug in de formules voor het bepalen van de grenssnelheid, retourstroom en schroefstraalwerking, en zullen in het verdere van dit verslag uitgelegd worden. De parameters worden ook duidelijk uitgelegd in [Verheij, 2008].

De hydraulische verschijnselen, zoals retourstroom en spiegeldaling hebben verschillende effecten. De retourstroom kan erosie veroorzaken doordat water met relatief hoge snelheid over erodeerbaar materiaal stroomt. Dat kan zowel de vaarwegbodem als de oever zijn. De waterspiegeldaling heeft op oevers het effect van een tijdelijke verlaagde waterstand waardoor de hydraulische krachten op grondkerende constructies fluctueren en erodeerbaar materiaal uitspoelt door openingen in de oeverconstructie.

Schroefstraalwerking

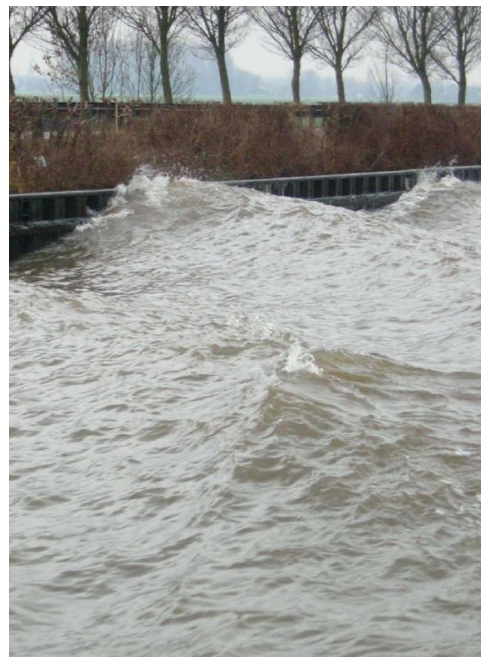
De schroefstraalwerking is de stroming die veroorzaakt wordt door de schroef. De schroefstralen kunnen bodem- en oevererosie veroorzaken. In veel gevallen wordt dit bepaald door schepen die langzaam varen, stilliggen of aan het manoeuvreren zijn bij een kade of voor een sluis. In het verleden is er onderzoek gedaan naar schroefstraalwerking en retourstroom en daarbij is bepaald dat de retourstroom maatgevend is voor erosie op de bodem. [Wal, 1983]

Hierbij werden de volgende uitzonderingen gemaakt:

- Manoeuvreren bij wachtplaatsen bij sluizen of loswallen;
- Bij het nemen van bochten en passeren van aansluitingen op zijkanalen;
- Het oplopen of tegemoetkomen van schepen;
- Extreme situaties waarbij een plotselinge manoeuvre moet worden uitgevoerd om een aanvaring te voorkomen.

Scheepsgolven

In het Amsterdam-Rijnkanaal treedt hinderlijke golfslag op in het Noordelijke pand, ter plaatse van het gebroken bakprofiel. De golven kunnen niet dempen doordat de golf gereflecteerd teruggekaatst wordt. Dit is hinderlijk voor afgemeerde schepen langs het kanaal, en het geeft een onrustig vaarbeeld. Ook kleinere schepen en jachten hebben hier last van. Grotere schepen vinden het minder prettig maar ervaren het niet als erg hinderlijk. In een gesprek met een binnenvaartschipper kwam wel naar voren dat veel kanalen in Duitsland uitgevoerd zijn met aan één zijde een damwand en aan de andere zijde een taludoever en een snelheidsbeperking van 12 km/uur. Volgens de binnenvaartschipper vaart dit veel prettiger dan op het Amsterdam-Rijnkanaal. Hij gaf sterk de voorkeur aan dat type kanalen, omdat de golven hier veel sneller uitdempen. Om de bevaarbaarheid van het kanaal te verhogen, adviseert deze schipper om



Figuur 3-12: Scheepsgolven.

de snelheid te verlagen.

Golven in het Betuwepand dempen direct uit op het talud, hierdoor treedt in het Betuwepand niet het onrustige vaarbeeld op dat wel in het Noordelijke pand optreedt.

Grenssnelheid van het schip

Het is van belang om te weten wat de grenssnelheid van het schip is. Met deze snelheid kan bepaald worden hoe hard geladen of ongeladen schepen kunnen varen. De grenssnelheid geeft aan hoe hard een schip kan varen in een beperkte vaarweg. De nieuwe schepen krijgen steeds meer vermogen waardoor het vermogen niet maatgevend is voor de vaarsnelheid maar de afmetingen van het kanaal. Een voorbeeld hiervan is dat schippers kunnen merken dat een kanaal is uitgebaggerd waardoor met hetzelfde vermogen harder gevaren kan worden.

De maximale snelheid van een schip in een beperkte vaarweg wordt de grenssnelheid of limietsnelheid (V_{lim}) genoemd.

De vraag is welke snelheid varen de grote schepen en waarom kunnen deze schepen niet harder varen? Hiervoor kunnen verschillende formules gebruikt worden om dit uit te rekenen, deze formules zijn ontleend aan de [Rock manual, 2007]. De vaarsnelheid van deze schepen zal verder uitgewerkt worden door gebruik te maken van formules om de limietsnelheid te kunnen bepalen.

De snelheid van een motorschip hangt af van de weerstand van het schip en het motorvermogen. Een schip kan op open water niet harder varen dan de snelheid van de primaire golf die het genereert. Met behulp van de lineaire golftheorie (korte golf) kan de snelheid van het schip bepaald worden.

$$V_{Lim} = c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}} \quad 3-3-1$$

V_{Lim}	Limietsnelheid	[m/s]
c	Golfsnelheid	[m/s]
g	Gravitatie	[m/s ²]
L	Lengte schip	[m]
h	Waterdiepte	[m]

Als de dwarsdoorsnede van een schip niet verwaarloosd kan worden ten opzichte van de vaarwegprofiel, kan de lineaire golftheorie niet meer gebruikt worden. (dus in ondiep water met breedtebeperking). Hierbij kan direct geconcludeerd worden dat de snelheid van een schip op het Amsterdam-Rijnkanaal niet met de lineaire golftheorie bepaald kan worden. Wel kan gebruik gemaakt worden door de samenvoeging van de continuïteitsvergelijking en de vergelijking van Bernouilli. Deze formule is bruikbaar in beperkende breedte en diepte verhoudingen. De formule is dan niet meer afhankelijk van de lengte van het schip maar van de verhouding tussen het nat oppervlak van het schip en het nat oppervlak van het kanaal. In de [Rock manual, 2007] is de vergelijking voor de scheepsnelheid als volgt geformuleerd:

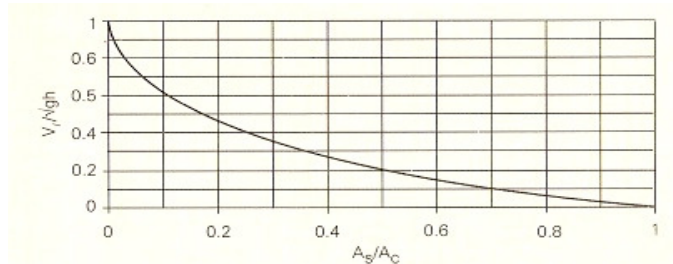
$$V_{lim} = F_I \sqrt{g A_c / b_w} \quad 3-2$$

Waarin

$$F_I = \left[\frac{2}{3} \left(1 - \frac{A_m}{A_c} + 0,5 F_I^2 \right) \right]^{2/3}$$

F_l	Coëfficiënt	[m]
A_c	Nat dwarsoppervlak kanaal	[m ²]
A_m	Midscheeps dwarsoppervlak	[m ²]
b_w	Breedte op waterlijn	[m]

Deze benadering wordt ook wel de lange golfbenadering genoemd. Door middel van een iteratieproces wordt de scheepsnelheid gegeven. In figuur 3-13 kan de scheepsnelheid ook worden afgelezen.



Figuur 3-13: Grenssnelheid gerelateerd aan waterdiepte en blockage. [Schierrek 2001]

De bovenstaande vergelijkingen en figuur geven de basis voor de grenssnelheid van een schip. De grenssnelheid wordt door motorschepen niet gevaren, omdat dit uit economische overwegingen te duur is. Meestal wordt een snelheid van 0,9 maal de grenssnelheid aangehouden voor ongeladen schepen en 0,7 maal de grenssnelheid voor geladen schepen. Natuurlijk wordt er soms harder gevaren, maar de grenssnelheid wordt niet overschreden, dit heeft te maken met de afmetingen van het schip vorm van het schip en het type voortstuwing. Wanneer een schip sneller wil varen dan de grenssnelheid zal de waterverplaatsing klein moeten zijn, het schip zal dan net zoals bij een speedboot uit het water moeten komen, dit is niet het geval met binnenvaartschepen.

Of nieuwe schepen met een groter motorvermogen daadwerkelijk harder kunnen varen dan schepen met een minder groot vermogen hangt af van de verhouding tussen nat dwarsoppervlak van het schip en het nat oppervlak van de vaarweg. Voor schepen met een lengte van 135 meter en een breedte van 17 meter en een diepgang van 4 meter ligt de grenssnelheid op ruim 15 km/uur. Uit onderstaande tabel blijkt dat de maximale snelheid die op het kanaal gevaren mag worden 18 km/uur, niet gehaald wordt, eenvoudigweg omdat dit niet mogelijk is.

Voor het huidige kanaal is de grenssnelheid als volgt:

positie schip in midden van kanaal	Scheepsklasse (zie Bijlage2)		
	M8/M9	M10	4-baks duwstel
Grenssnelheid [km/uur]	17,52	15,78	14,24
0,9 V_{lim} [km/uur]	15,77	14,20	12,81
0,7 V_{lim} [km/uur]	12,26	11,05	9,97

Tabel 3-7: Snelheid per scheepsklasse.

Scheepsklasse M8 en M9 hebben beide dezelfde breedte alleen een andere lengte. Dit verklaart dan ook dat de grenssnelheid voor deze scheepsklassen hetzelfde is, omdat in de formule de grenssnelheid afhangt van de breedte en niet van de lengte van het schip.

3.4 De gevolgen van schaalvergroting voor het kanaalprofiel

Schaalvergroting is:

1. Er komen steeds meer grote schepen in de vaart en er verdwijnen vooral kleinere schepen;
2. De nieuwe grootste schepen zijn groter dan ze ooit waren. Ook nemen de motorvermogens van de hoofdmotoren en boegschroeven steeds verder toe.

De gevolgen van de schaalvergroting zijn onderzocht in [Alkyon, 2005]. De effecten die de schaalvergroting van de vloot heeft op de vaarwegen zijn voornamelijk toe te schrijven aan twee hoofdaspecten die elk hun specifieke gevolgen kunnen hebben.

Effecten van grotere tonnages, dat wil zeggen grotere afmetingen van het vaartuig:

- Aanvaarbelasting op remmingwerken, brugpijlers, sluisdeuren, etc.;
- Wijziging krachten (grootte en richting) op afmeervoorzieningen;
- Sterkere oeverzuiging en retourstroom (bij gelijke vaarsnelheid).

Effecten door hogere motorvermogens:

- Sterkere retourstroom en grotere waterspiegeldaling in de vaarwegvakken met als gevolg hogere hydraulische belastingen op oevers en vaarwegbodems;
- Lokale erosie door schroefstralen van hoofdschroef en boegschroef; dit zal vooral optreden op plaatsen waar veel gemanoevreerd wordt, maar ook in vaarwegvakken bij ontmoetingen (frequent) en eventuele ophoopmanoeuvres. Schroefstraalerosie kan de stabiliteit van oevers, kademuuren, geleidewerken, sluisdrempels, duikers, leidingen, etc. bedreigen.

Deze effecten treden ook op in het Amsterdam-Rijnkanaal, er zijn ontgrondingen die langs de damwanden optreden waardoor de damwanden instabiel worden. Zo zijn een aantal jaren geleden bij Maarssen damwanden vervangen die door ontgrondingen instabiel zijn geworden. Op dit moment voldoet 60 kilometer niet aan de gestelde eisen. Voor 2018 zal 30 kilometer oeverconstructie gerenoveerd dienen te worden, op dit moment voldoen deze damwanden niet. Bij uitblijven van acties aan deze damwanden is de verwachting dat de damwanden zullen falen.

Enkele citaten van het rapport [Alkyon,2005] uit het hoofdstuk 4. Effecten en gevolgen in kanalen:

Noch uit de literatuur, noch uit interviews kwamen voorbeelden naar voren waaruit bleek dat schaalvergroting van de vloot spectaculaire veranderingen in retourstroom, schroefstraal en haalgolf tot gevolg had. Overeenkomstig de genoemde theorie (Schijf) kwamen steeds weer de twee hoofdfactoren in beeld: de vaarsnelheid en de verhouding van de natte doorsneden van schip en vaarweg. Ook de afstand tussen schip en oever werd genoemd. Uit een en ander bleek niet eenduidig dat schaalvergroting in gewone vaarwegvakken tot sterke erosie zou leiden. Mogelijk is die eerder toe te schrijven aan de toegenomen vervoerstream.....

... De genoemde erosie verschijnselen (oevers en bodem), zijn direct gerelateerd aan de hydraulische belastingen van retourstroom en spiegeldaling. Uit de berekeningen bleek dat retourstroom en spiegeldaling door de schaalvergroting toenemen... ... De toename van de breedte (en diepgang) van de schepen zoals te zien bij de 135m-schepen doet de retourstroom toenemen met ruim 40%... ... De schaalvergroting van de vloot heeft dus grote invloed op de effecten van (voornamelijk) de retourstroom, en daarmee op de sterkte van erosie van oevers en bodems in kanalen.

Opmerking: de citaten uit dit rapport lijken elkaar tegen te spreken. Uit de literatuur blijkt dat vergroting van het nat dwarsoppervlak van een schip in hetzelfde kanaalprofiel, een grotere retourstroom genereert. Dit blijkt ook uit de tweede alinea van bovengenoemde tekst.

Uit de literatuur blijkt dat in het verleden veel onderzoek gedaan is naar varende schepen in kanalen en welke gevolgen dit heeft voor de vaarweg. Zo hebben Schijf en Jansen al onderzoek gedaan en is in de jaren '80 het eendimensionale programma DIPRO ontwikkeld. Dit programma is door [Alkyon, 2005] gebruikt voor de bepaling van de waterspiegeldaling en de retourstroming.

In het Amsterdam-Rijnkanaal is het van belang om de erosiekuilen te voorspellen zodat falen van de oeverconstructie voorkomen kan worden in een nieuw ontwerp. Een model wat dergelijke voorspelingen kan doen voor meerdere schepen tegelijkertijd in één profiel is nog niet ontwikkeld.



Figuur 3-14: Scheurvorming door verzakking damwand.

4 Selectie mogelijk kanaalprofiel

De geïnventariseerde gegevens zijn van belang om zo het verdere ontwerp van het kanaalprofiel in de juiste context te plaatsen. In de volgende paragrafen zal een keuze gemaakt worden voor de onderzoekslocatie en een globaal kanaalprofiel. Aan de hand van een multicriteria analyse zal voor dit deelgebied een globaal kanaalprofiel ontworpen worden wat representatief is voor het Amsterdam-Rijnkanaal.

Verder wordt dit hoofdstuk globaal het kanaalprofiel bepaald, dat het uitgangspunt vormt voor verder rekenwerk aan de hydraulische belastingen in een later stadium van dit onderzoek.

4.1 Keuze locatie deelgebied

Om een nieuw kanaalprofiel te ontwerpen is het van belang dat er een representatieve locatie gekozen wordt. Een representatieve locatie is een locatie die voldoet aan onderstaande criteria, maar ook een locatie waar een kanaalprofiel gedimensioneerd kan worden dat op meerdere plaatsen in het kanaal toepasbaar is. Dit profiel dient ook met enige aanpassingen toepasbaar te zijn op grote delen van het Amsterdam-Rijnkanaal. Tussen Amsterdam en Utrecht zijn plaatselijk mogelijkheden om het kanaal te verbreden of een natuurvriendelijke oever aan te leggen. Om grootschalige verbredingen uit te kunnen voeren is het raadzaam om dit verder te onderzoeken, zowel planologisch als maatschappelijk. Deze zaken zullen in dit rapport niet meegenomen worden.

Enkele criteria die bepalend zijn voor een keus van een representatieve locatie:

- Geen kadeconstructies of afmeervoorzieningen;
- Geen plotselinge wijzigingen in het kanaalprofiel (zoals bochten etc.);
- Traject waar ontgroning geconstateerd wordt, binnen de invloedssfeer van damwanden;
- Kanaaltraject met een hoge verkeersintensiteit.

Het is van belang dat een traject gekozen wordt dat een gebroken bakprofiel heeft. Het gebroken bakprofiel is een representatief profiel, wat veel toegepast is in het kanaal. Van belang is dat op het traject dat gekozen wordt zoveel mogelijk neveneffecten worden uitgesloten. Neveneffecten ontstaan bij bochten, plotselinge versmallingen, aan- en afmeer voorzieningen. Deze zaken geven een complex vaarbeeld, door wisselend gebruik van het motor- en boegschroefvermogen en wisselende snelheden. Deze neveneffecten veroorzaken hydraulische belastingen die voor de berekening van het standaardontwerp ruis veroorzaken. Om de verschillende neveneffecten uit te sluiten zal een traject gezocht worden waarbij deze zaken zo min mogelijk voorkomen zodat ze in de berekening verwaarloosd kunnen worden. Daarom wordt als onderzoekslocatie gekozen voor een recht en uniform kanaaltraject, zodat een representatief profiel ontworpen kan worden voor het Amsterdam-Rijnkanaal.

Een ander belang wat meespeelt is dat voldoende erosie optreedt in de vaarwegvakken waar onderzoek gedaan wordt, dus een situatie waarbij de stroming die door de scheepvaart gegenereerd wordt hoger is dan de kritische korrelschuifspanning van het bodemmateriaal en daardoor erosiekuilen veroorzaakt. Ten noorden van de splitsing met het Lekkanaal is de verkeersintensiteit op het Amsterdam-Rijnkanaal veel groter dan ten zuiden van het Lekkanaal. Daarom zal de onderzoekslocatie liggen op het traject met de hoogste verkeersintensiteit en dus ten noorden van de splitsing met het Lekkanaal.

Twee verschillende trajecten waar onderzoek gedaan kan worden.

- Van kilometer 20,0 tot kilometer 26,0. Dit traject ligt ten noorden van Breukelen;
- Van kilometer 37,0 tot kilometer 40,0 een traject wat langs Kanaleneiland en voorbij Westraven (Utrecht) ligt.

Op deze twee trajecten zijn verschillende mogelijkheden voor onderzoek. Een opvallend verschil in de twee trajecten is, dat het traject langs Utrecht voornamelijk een stedelijke bebouwing heeft en het traject bij Breukelen door landelijk gebied gaat.

Het traject bij Utrecht betreft een recht kanaal gedeelte, dit gedeelte is ongeveer drie kilometer lang. Op dit traject komen ontgrondingen voor, de omvang hiervan is groot genoeg voor verder onderzoek. Langs dit traject liggen wel enkele afmeerplaatsen, waar schepen manoeuvreren, en daar dus een hogere hydraulische belasting genereren. Het kanaalprofiel bestaat uit een gebroken bakprofiel en een licht variërende breedte. Een ander punt op dit traject is dat het binnen de bebouwde kom van Utrecht echter lastig is om met kleine aanpassingen het kanaal te verbreden. Vaak zal een totaalplaatje gemaakt worden zodat de omgeving en het kanaal op elkaar aangepast worden. Zo is de Gemeente Utrecht met een studie begonnen voor het aanpakken van de wijk Kanaleneiland (infrastructuur). Enkele onderwerpen uit deze studie zijn van belang voor het Amsterdam-Rijnkanaal zoals een boulevard aan de oostelijke oever en aan de westelijke kant een natuurvriendelijke oever.

Het andere traject ligt ten noorden van Breukelen. Dit traject is zes kilometer lang, ook hier betreft het een recht kanaalgedeelte. Op dit traject treedt ontgroning op binnen de invloedslijnen van de oeverconstructie. Langs het traject zijn geen afmeervoorzieningen of kademuren. Het kanaalprofiel bestaat uit het gebroken bakprofiel en de breedte is over het gehele traject ongeveer gelijk. Bij Nieuwersluis komt een klein kanaaltje uit in het Amsterdam-Rijnkanaal. Dit is een kanaaltje wat gebruikt wordt door kleine motorjachten. Door de geringe afmetingen kan dit zijkanaaltje verwaarloosd worden in verdere berekeningen voor het kanaalprofiel. Het traject ligt overwegend in landelijk gebied. Ten westen van het traject ligt een spoorlijn dicht langs het kanaal, de spoorlijn is verbreed met twee sporen en loopt langs de gehele onderzoekslocatie. Ook loopt er een weg langs het kanaal, waar ook fietsers gebruik van maken.



Figuur 4-1: Zijkanaaltje (Nieuwersluis) met recreatie vaart



Figuur 4-2: Spoorlijn naast kanaal

Criteria	Breukelen	Utrecht
Lengte (recht kanaalgedeelte)	6,0 kilometer	3,0 kilometer
Ligging	landelijk	stedelijk
Ontgroning	ja	ja
Afmeerplaatsen	nee	ja
Standaard profiel	ja	ja
Zijkanaaltje	ja	nee
Aanleg boulevard	nee	ja
Mogelijkheid natuurvriendelijke oever	ja	gedeeltelijk
Hinder neveneffecten	nee	gedeeltelijk

Tabel 4-1: Criteria verschillende locaties

De onderzoekslocatie

Er is gekozen voor een locatie bij Breukelen. De voordelen van Breukelen ten opzichte van Utrecht zijn:

- Het traject bij Breukelen is langer;
- Minder neveneffecten bij Breukelen, door afwezigheid van aan- en afmeervoorzieningen;
- In Breukelen ontbreekt de complexiteit van de stedelijke bebouwing rondom het kanaal;
- Ook zijn mogelijkheden aanwezig om aan beide zijden van het kanaal een natuurvriendelijke oever te creëren.

Het traject ten noorden van Breukelen van km. 20,0 tot km. 26,0 is geschikt om verder te onderzoeken, het betreft hier een recht en uniform kanaalgedeelte.



Figuur 4-3: Recht kanaal gedeelte ten noorden van Breukelen

In figuur 4-3 is een deel van de onderzoekslocatie te zien. De lengte van de onderzoekslocatie is zes kilometer, de breedte is over het algemeen genomen 100 meter en de maximale waterdiepte is zes meter. Het standaard gebroken bakprofiel is hier overal aanwezig. Op de onderzoekslocatie zijn ontgroningen geconstateerd, binnen 15 meter van de damwand, tussen de 0,20 en 1,70 meter. De tussenliggende waarden zijn in tabel 4-2 te zien. In de bijlage 5 zijn de ontgroningen over het gehele kanaaltraject te zien.

ARK	oostzijde	westzijde
km. - km.	te diep	te diep
20,00 - 20,50	1,00	1,00
20,50 - 21,00	1,10	1,20
21,00 - 21,50	0,80	1,40
21,50 - 22,00	0,90	1,10
22,00 - 22,50	0,90	1,30
22,50 - 22,75	0,50	0,50
22,75 - 23,25	0,80	1,20
23,25 - 24,25	1,70	*
23,25 - 23,80	*	1,00
23,80 - 24,25	*	0,40
24,25 - 24,50	0,60	0,70
24,50 - 24,75	0,90	0,40
24,75 - 25,10	0,50	0,20
25,10 - 25,50	0,70	0,80
25,50 - 26,00	0,70	1,00

Tabel 4-2: Ontgroningen in meters t.p.v. onderzoekslocatie op 15 meter uit de damwand.

*geen data aanwezig.

4.2 Bepalen kanaalprofiel

Een kanaalprofiel kan onderverdeeld worden in twee delen een oeverconstructie en de hoofdafmetingen. Hoofdafmetingen zijn de bodembreedte en de waterdiepte en de breedte op de waterlijn. In deze paragraaf zal een opzet gegeven worden voor verschillende varianten voor het kanaalprofiel. Ook zal een verdere uitwerking gegeven worden waarbij rekening gehouden wordt met de beperkte beschikbaarheid van rekenmodellen. Ook zijn niet alle gegevens over bijvoorbeeld de bodemgesteldheid van het kanaal en de vaarsnelheden van de schepen beschikbaar gesteld, ook ontbreken de verdere peilingen van de bodemligging.

Het inpassen van boulevards en verschillende mogelijkheden van wonen aan het water worden in dit rapport niet verder onderzocht.

Verder zal in dit onderzoek geen rekening gehouden worden met aan- en afmeervoorzieningen langs het kanaal en dus ook niet met manoeuvrerende schepen dicht aan de oeverconstructie. Berekeningen voor een bodembescherming bij kadeconstructies zijn al uitgevoerd, en bij Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur beschikbaar.

4.2.1 Oeverconstructie

Een oever is een overgangsgebied tussen land en water. De definitie van een oever langs kanalen is aan de landzijde de plaats tot waar het water kan komen onder invloed van peilbeheer, golven en opstuwning (uitgezonderd kwel). Aan de waterzijde is de grens de teen van het talud. Een andere benadering is de waterdiepte tot waar er lichtinval is. In Nederland ligt deze waterdiepte op ongeveer 1,5 meter [CUR 201, 1999].

Een oeverconstructie is ook het deel van een kanaalprofiel wat direct zichtbaar is. Een oeverconstructie is van invloed op de benodigde breedte van het kanaal. In de waterbouwkunde zijn verschillende oeverconstructies mogelijk. In deze paragraaf worden verschillende oeverconstructies genoemd, waarbij de nadruk wordt gelegd op oeverconstructies die op de

onderzoekslocatie toegepast kunnen worden. De oeverconstructies zijn afhankelijk van de functies en de belangen die rondom een oever spelen. Enkele verschillende oeverconstructies:

- Taludoever maximale taludhelling 1:3;
- Taludoever met een oeverbescherming;
- Natuurvriendelijke oevers in combinatie met plasbermen, doorgroeistenen etc.
- Stalen damwanden;
- Combinaties van bovenstaande oplossingen.

Hierna volgen enkele algemene punten die spelen bij het Amsterdam-Rijnkanaal en van belang zijn voor het beeld van een oeverconstructie. Als eerste moet de oever de veiligheid van de kanaaldijk garanderen, de oeverconstructie is namelijk een onderdeel van de waterkering (dit is verder besproken in paragraaf 3.2.1). De bevaarbaarheid van het kanaal is medebepaald door het type oever. Verder dient de stabiliteit van de oeverconstructie niet ondermijnd te worden door erosie.

Omdat het Amsterdam-Rijnkanaal een barrière vormt in de EHS (Ecologische Hoofd Structuur) zal in het oeverontwerp rekening gehouden worden met de natuur. Vanuit Rijkswaterstaat is in de [BPRW 2010-2015] opgenomen dat waar mogelijk groot onderhoud en aanpassingen aan de infrastructuur gepaard dient te gaan met aanleg van natuurvriendelijke oevers. Daarom zal onderzoek gedaan worden naar een mogelijkheid om natuurvriendelijke oevers te realiseren, indien mogelijk aan beide oevers.

Een andere mogelijkheid is aan één zijde een natuurlijke oever en aan één zijde een damwandprofiel met enkele Fauna Uitrede Plaatsen (FUP).

Taludoever

Een taludoever is een oever die toegepast kan worden als er genoeg ruimte beschikbaar is. Bij toepassing van een flauw talud kunnen schepen met een geringe diepgang boven het talud varen en de groter schepen varen in het midden van het kanaal. Door deze taludoever zullen golven uitdempen, ook vermindert het de hinderlijke oeverzuiging. Aan de bovenzijde van het talud treedt door golfbelasting uitspoeling van het talud op. In de diepere gedeelten op het talud treedt uitspoeling op door de retourstroom en schroefstralen.

Een flauw talud neemt veel ruimte in beslag (in de orde van 20 meter aan één zijde). Een steil talud zal tot een bepaalde waterdiepte of over de gehele lengte van het talud verdedigd dienen te worden om zo uitspoeling te voorkomen.

Om het geheel te beschermen kan er gekozen worden voor oeverbescherming. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden. Men kan kiezen voor stortsteen, deze stenen zijn er in verschillende sorteringen. Wanneer de belastingen bekend zijn is het mogelijk om deze gradering te berekenen. In DIPRO zijn deze zaken geprogrammeerd zodat de hydraulische belastingen en de gradering berekend kunnen worden. Op dit moment worden voor dergelijke oeverconstructies vaak de sortering 10-60 kg gebruikt.

Men kan ook kiezen voor gepenetreerde stortsteen, dit is ook toegepast in het Amsterdam-Rijnkanaal (Betuwepand). Natuurorganisaties hebben aan Rijkswaterstaat te kennen gegeven dat deze oever geen waarde heeft voor de natuur. Zij gaven aan dat een grove breuksteen oever de voorkeur heeft.

Zetsteen heeft een hoge prijs per m² en zal alleen op plaatsen gebruikt worden waar dit niet anders kan, zoals overgangen naar duikers of aansluitingen op waterbouwkundige constructies. Een taludoever kan bij gebruik van de juiste materialen toegepast worden als een natuurvriendelijke oever.

Natuurvriendelijke oever

Door de aanleg van een natuurvriendelijke oever wordt de dwarsbarrière die het kanaal nu heeft opgeheven. Hierdoor is uitwisseling tussen verschillende ecologische hoofdgebieden mogelijk. De ecologische waarde verbetert sterk wanneer vegetatie op de oevers ontstaat. Hierdoor hebben vogels en allerlei andere dieren schuilmogelijkheden.

Een natuurvriendelijke oever met een brede plasberm neemt veel ruimte (>20m) in beslag en is daardoor een dure oplossing. Om een plasberm te beschermen tegen golfslag dient een golfbrekende constructie aangelegd te worden. Aanleg van een dergelijke 'brede' oeverconstructie zal niet representatief zijn voor de onderzoekslocatie, en wordt daarom niet meegenomen in de alternatieven. Wel zullen de andere oplossingen op het gebied van natuurvriendelijk oevers verder uitgewerkt worden.

Door geringe aanpassingen in het Amsterdam-Rijnkanaal is het al mogelijk om het geheel natuurvriendelijker te maken dan de huidige situatie. Een taludoever in combinatie met stortstenen oever zorgt voor een verbetering in de uittreedbaarheid voor fauna. En het realiseren van een doorgroeibare oever geeft de flora ook een kans om zich te ontwikkelen in het Amsterdam-Rijnkanaal. Hierbij kan gedacht worden aan doorgroeistenen of een talud met stortsteen waar riet en waterplanten in geplant worden, zodat de ontwikkeling van de natuurvriendelijke oever bevordert wordt. Van belang is dat de plantengroei aangepast dient te worden aan de golfbelasting op het talud. Voor de vele verschillende oplossingen en het gebruik van materialen wordt verwezen naar [CUR 201 en 202, 1999].

Stalen damwand

Een stalen damwand is op dit moment de meest toegepaste oplossing voor het kanaalprofiel. Bij een nieuw profiel dient duidelijkheid te zijn over de ontgrondingen die binnen de invloedslijnen van de damwandconstructie vallen. Door duidelijkheid te krijgen over de erosiekuilen en dit mee te nemen in een nieuw ontwerp kan de kans op falen van de damwand door erosie verminderd worden. Het toepassen van een damwandconstructie heeft als voordeel dat weinig ruimte nodig is voor de overgang tussen land en water. Vanuit esthetisch en maatschappelijk oogpunt is een damwand die één meter boven de waterspiegel uitsteekt geen juiste keuze. Een stalen damwand behoort dan tot een uitwijk mogelijkheid als andere mogelijkheden uitgesloten zijn. Een fauna uittrede plaats is een constructie die vaak toegepast wordt bij stalen damwanden om zo de barrièrewerking tegen te gaan in het kanaal.

Combinatie van oeverconstructies

Door het combineren van verschillende oeverconstructies kunnen de voordelen van verschillende oeverconstructies samengevoegd worden tot één oeverconstructie die representatief is voor het Amsterdam-Rijnkanaal.

Het ruimtebesparende aspect van een damwandconstructie is een aspect wat goed gebruikt kan worden in het Amsterdam-Rijnkanaal. Door deze oeverconstructie te combineren met een taludoever met een maximale steilheid van 1:3 is het mogelijk om ruimte besparend te ontwerpen maar toch met de voordelen van een taludoever. De damwand dient één meter onder de waterspiegel over te gaan in een talud dat doorloopt tot één meter boven de waterspiegel. Het talud kan verdedigd worden met stortsteen of een andere oplossing die de golfbelasting kan weerstaan. Op een talud zullen de meeste golven uitdempen en dit geeft een rustig vaarbeeld op het kanaal. Een nadeel is echter dat de oeverzuiging die optreedt door dicht langs de kant te varen in deze oeverconstructie nog altijd aanwezig is.

In dit ontwerp kunnen functionaliteit en natuurwaarden samengaan.

Korte samenvatting van de verschillende oeverconstructies:

Soort oever	Voordeel	Nadeel
Taludoever	<ul style="list-style-type: none"> • Vergroot het wateroppervlak; • Minder last van oeverzuiging; • Dempt golven uit; • Kan natuurvriendelijk uitgevoerd worden; • Opheffing van dwarsbarrière voor flora en fauna; 	<ul style="list-style-type: none"> • Neemt meer ruimte in beslag dan b.v. een damwand oever; • Bestorting nodig op talud tegen golfaanval.
Natuurvriendelijke oever	<ul style="list-style-type: none"> • Kan het wateroppervlak vergroten; • Opheffing van dwarsbarrière voor flora en fauna; • Geeft het kanaal een natuurlijk karakter; • Dempt golven uit. 	<ul style="list-style-type: none"> • Neemt meer ruimte in beslag dan taludoever; • Soms golfbreker nodig voor bescherming van 'brede' plasberm; • Bestorting nodig tegen golfaanval.
Stalen damwand	<ul style="list-style-type: none"> • Ruimte besparende oplossing; • Schepen kunnen de hele breedte van het kanaal gebruiken. 	<ul style="list-style-type: none"> • Niet natuurvriendelijk; • Geeft het kanaal een industrieel uiterlijk; • Golven dempen niet uit; • Dicht langs de kant varen geeft oeverzuiging.
Combinatie	<ul style="list-style-type: none"> • Neemt relatief weinig ruimte in gebruik (6 m per zijde meer); • Biedt plaats voor natuurontwikkeling. • Geeft het kanaal een natuurlijk karakter; • Dempt golven uit. 	<ul style="list-style-type: none"> • Probleem van oeverzuiging niet opgelost; • Bestorting nodig op talud tegen golf aanval.

Tabel 4-3: Voor- en nadelen van verschillende oevers

Een combinatie van verschillende oevers zal de voorkeur hebben in verband met de gestelde eisen uit hoofdstuk 2.5.1. Hierbij komen maatschappelijke ontwikkelingen naar voren zoals inpassing in het gebied. Welke functies kunnen er aan de oevers gesteld worden zodat meerdere functiegroepen hiervan gebruik kunnen maken, denk hierbij aan de eisen van vissers recreanten die op de oever recreëren of recreanten op het water. Het kanaalprofiel wordt verder besproken in de multicriteria analyse.

4.2.2 Bepalen hoofdafmetingen van profiel

Bij het bepalen van de hoofdafmetingen voor het kanaalprofiel op de onderzoekslocatie zijn de volgende gegevens van belang:

- Vorm dwarsprofiel;
- Breedte op het kielvlak;
- Breedte op de bodem;
- Waterdiepte.

De Richtlijnen Vaarwegen 2005 van Rijkswaterstaat [RVW,2005] geeft voor de hoofdafmetingen van een kanaalprofiel verschillende waarden. Deze waarden zijn afhankelijk van de scheepsklasse die geldt op het kanaal. Ook de verkeersintensiteit is van belang voor het bepalen van de afmetingen van het kanaal. De [RVW, 2005] geeft per CEMT-klasse richtlijnen voor het bepalen van de afmetingen van het kanaalprofiel. Enkele beperkingen bij deze richtlijn zijn van toepassing. De CEMT-klassificatie loopt tot V, en de afmetingen van de kanalen gaan tot een verkeersintensiteit van 30.000 passages per jaar. Toch zal in de onderstaande punten gerefereerd worden aan deze richtlijn, dit is alleen ter indicatie.

Vorm dwarsprofiel

De vorm van het dwarsprofiel hangt veelal af van de beschikbare ruimte op de locatie en het benodigd nat oppervlak en het type oeverconstructie.

Breedte op het kielvlak

Volgens [RVW, 2005] is er een hoge verkeersintensiteit als er 15.000 passages per jaar of meer dan 50 passages per dag zijn, boven de 30.000 passages dient nader onderzoek gedaan te worden naar de benodigde afmetingen voor het kanaalprofiel. Het Amsterdam-Rijnkanaal heeft 100.000 passages per jaar en kan met recht een druk bevaren kanaal genoemd worden. De breedte op de waterspiegel is afhankelijk van de verkeersintensiteit en de capaciteit van het kanaal.

De [RVW, 2005] geeft hiervoor de volgende waarden voor een klasse V vaarweg: de breedte is 4x de maatgevende scheepsbreedte. Dit komt neer op vier keer de breedte van een vierbaksduwstel. Ook dient hierbij een zijwindtoeslag gerekend te worden deze bedraagt voor een klasse V profiel 9 meter.

De totale breedte komt dan neer op 100,2 meter. In het huidige kanaalprofiel voor klasse VIb schepen is deze breedte iets lager en komt neer op 93,6 meter. De verhouding tussen verkeersintensiteit en capaciteit geeft op dit moment geen problemen op het kanaal. Binnen Rijkswaterstaat is verder geen probleem geconstateerd dat deze breedte in de toekomst problemen gaat geven (wel is er een capaciteitsprobleem bij de Prinses Beatrixsluizen zie paragraaf 3.1).

Breedte op de bodem

Voor de capaciteit en intensiteit verhouding is het niet nodig om de bodembreedte te vergroten. Maar omdat de hydraulische belastingen gegenereerd door de scheepvaart groot zijn, kan dit instabiliteit van de oeverconstructie veroorzaken. Bij vergroting van de bodembreedte zal deze erosie minder worden. De breedte op de bodem is de effectieve breedte die nodig is voor het maatgevende schip of de scheepscombinatie. Schepen met een geringe diepgang kunnen boven een onderwatertalud varen, terwijl een maatgevend schip dan aan de grond loopt.

De [RVW, 2005] geeft dat de bodembreedte bij een normaal tweestrooksprofiel een minimale bodembreedte benodigd is van 2x de maatgevende scheepsbreedte. Dit is weer het vierbaksduwstel met een breedte van 22,80 meter. Hierbij komt de benodigde bodembreedte neer op 45,6 meter, in de huidige situatie is de bodembreedte veel groter en komt op een breedte van 61,60 meter. Hieruit blijkt dat in het Amsterdam-Rijnkanaal de bodembreedte groot genoeg is.

Waterdiepte

Voor de bevaarbaarheid van het kanaal is het natte oppervlak een belangrijk gegeven. Wanneer de [RVW, 2005] toegepast wordt voor de waterdiepte blijkt dat de waterdiepte 1,4 maal de diepgang van het maatgevend schip dient te zijn voor een klasse V vaarweg. In het Amsterdam-Rijnkanaal is de parameter al 1,5 wat een waterdiepte oplevert van 6,00 meter.

Omdat het natte oppervlak en de waterdiepte van elkaar afhangen en omdat in de breedte op het Amsterdam-Rijnkanaal geen grote veranderingen mogelijk zijn, en verder voldoet, is in dit ontwerp alleen de waterdiepte van belang. Enkele vuistregels voor het bepalen van de waterdiepte zijn ontleend aan de literatuur [m1115 XX,1988]. Deze literatuur is gebaseerd op metingen en studies van eind jaren '70 en begin jaren '80 van de vorige eeuw. Het gebruik van de vuistregels uit deze literatuur is nog niet getoetst voor meerdere schepen en de grotere schepen die de laatste jaren in de binnenvaart in gebruik genomen zijn. De vuistregels worden nog als indicatie gebruikt, maar onderzoek dient uit te wijzen of deze vuistregels nog voldoen voor de nieuwe generatie schepen.

De verhouding waterdiepte en diepgang zijn belangrijk om de erosie van de bodem te kunnen bepalen. Aan de hand van de verhouding tussen de waterdiepte en diepgang kan een indicatie van de mogelijke hydraulische belastingen bepaald worden. In de volgende situaties zijn de verschillende gevolgen te zien bij een waterdiepte en diepgang verhouding. Daarom zal verder onderzocht worden wat de mogelijkheden zijn voor een verdieping van het kanaal.

h/d verhouding	Gevolg	
$1,0 < \frac{h}{d_s} < 1,1 \sim 1,2$	Belasting bestaat uit volgstroom, schroefstraal en de retourstroom;	(4-1)
$1,1 \sim 1,2 < \frac{h}{d_s} < 1,2 \sim 1,3$	Belasting bestaat uit schroefstraal en de retourstroom;	(4-2)
$1,3 < \frac{h}{d_s} < 1,9 \sim 2,0$	Bij deze verhouding werkt alleen de retourstroom hier op de bodem;	(4-3)
$\frac{h}{d_s} > 1,9 \sim 2,0$	Hier beïnvloedt de scheepvaart de bodemligging nauwelijks.	(4-4)

h	Waterdiepte kanaal	[m]
d _s	Diepgang schip	[m]

Bij bovenstaande vergelijkingen is er vanuit gegaan dat de bodem vlak is en bestaat uit zand. De vergelijkingen geven een benadering voor de bepaling van de afmetingen van het kanaalprofiel.

Huidige situatie:

Wanneer de vuistregels toegepast worden op het huidige gebroken bakprofiel van het Amsterdam-Rijnkanaal (h/d_s verhouding 1,5) zal duidelijk zijn, dat in een dergelijk kanaalprofiel de retourstroom een cruciale rol speelt. Op het onderwatertalud loopt de h/d verhouding af en zullen de andere hydraulische belastingen uit de vgl. (4-1) en (4-2) ook een rol kunnen gaan spelen. Aan de hand van deze h/d_s verhouding ($< 1,3$) bestaat er een mogelijkheid dat in het huidige kanaal erosie kan voorkomen dicht bij de oeverconstructie.

Nieuwe situatie:

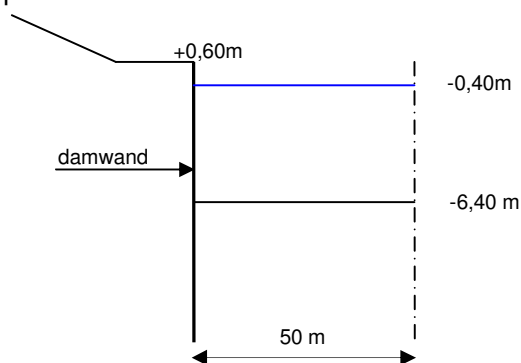
In een nieuwe situatie dient de h/d_s verhouding gelijk of groter dan 1,5 te zijn. Verder onderzoek naar de hydraulische belastingen en optredende erosie dient uit te wijzen of dit zal voldoen. Door de grotere diepte bij de oeverconstructie is de verwachting dat de erosie minder wordt. Verder onderzoek naar de hydraulische belastingen zal dat moeten uitwijzen. De h/d verhouding is daarbij een richtlijn.

Varianten

De wens van Rijkswaterstaat is dat een nieuw profiel een minimaal nat oppervlak van 600 m² heeft. Een nat oppervlak van 600 m² houdt in dat, bij een waterbreedte van 100 m de waterdiepte op de hele kanaalbodem 6,00 meter zal zijn. Hierbij is de h/d_s verhouding gelijk aan 1,5. De huidige natte doorsnede voor het normale profiel is 554 m². Wanneer het bodemtalud wordt weggebaggerd zal een oppervlakte van 600 m² natte doorsnede ontstaan. Hierbij is als uitgangspunt aangehouden dat het vergroten van het natte oppervlak het eroderen van de ondergrond tegengaat. Dit grotere nat oppervlak zal dan de bevaarbaarheid en de veiligheid voor de scheepvaart vergroten.

In de figuren 4-4, 4-5 en 4-6 zijn verschillende suggesties te zien voor het dwarsprofiel. Daarbij is in dit onderzoek het huidige gebroken bakprofiel buiten beschouwing gelaten. Dit profiel voldoet niet aan de wens van Rijkswaterstaat.

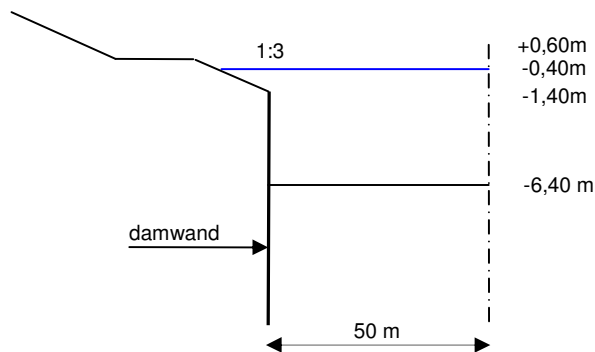
De breedte tussen de damwanden en de as van het kanaal is bij alle ontwerpen 50 meter. In de nieuwe kanaalprofielen (1), (2) en (3) wordt het natte kanaaloppervlak vergroot ten opzichte van het huidige profiel. De breedte van het kanaal wordt niet ter discussie gesteld, uitgaande dat de breedte van 100 meter voldoet voor de komende 50 jaar. Oplossingen worden gezocht in de diepte om daardoor het natte kanaaloppervlak te vergroten, denk hierbij aan een h/d_s verhouding die minimaal 1,5 is. De benodigde breedte van het kanaalprofiel zal afhangen van het type oeverconstructie.



Figuur 4-4: Kanaalprofiel (1)

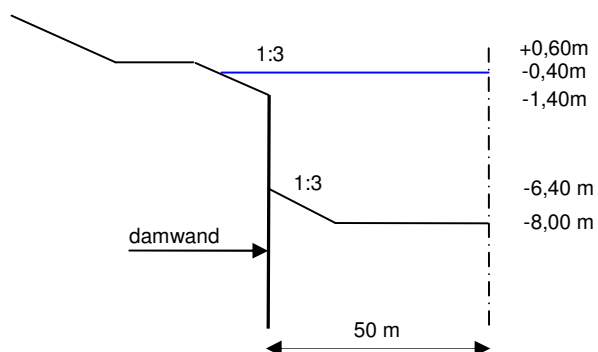
Binnen Rijkswaterstaat zijn verschillende inzichten betreffende de vorm van het kanaalprofiel, hiervan is profiel (1) een voorbeeld. In kanaalprofiel (1) wordt de huidige situatie voorgezet, ondanks andere inzichten. In dit profiel is het natte oppervlak vergroot door het onderwatertalud te verwijderen. Het natte oppervlak wordt nu 600 m². De h/d_s verhouding is hier 1,5. De oeverconstructie bestaat hier uit damwanden. De huidige damwanden worden getoetst of ze voldoen aan de nieuwe situatie. Nieuwe langere damwanden dienen aangebracht te worden als blijkt dat de oude damwanden niet voldoen. Uit het rapport van [Arcadis, 2009] blijkt dat 80 tot 85% (schatting) van de huidige damwanden niet voldoet wanneer dit het kanaalprofiel verruimd wordt tot 600m². In de huidige situatie voldoet ongeveer 60% van de damwanden niet aan de gestelde eisen.

Verder onderzoek dient uit te wijzen of het kanaal met een dergelijk profiel nog erosie geeft bij de damwandconstructie. Door de verticale oeverconstructie is er geen golfdemping op het kanaal. De klotsbak zal blijven bestaan doordat de golven niet uitdempen op het kanaal. Door het toepassen van duurzame materialen kunnen de materialen een levensduur van 50 jaar doorstaan, dit geldt niet voor de erosie die op kan treden en waarvan nog niet duidelijk is of dit de damwand beïnvloed. Het toepassen van een dergelijke oeverconstructie is een ruimte besparende oplossing. Er bestaat een mogelijkheid om de dwarsbarrière op te heffen door op plaatsen waar dat nodig is een FUP aan te leggen, dit is natuurlijk wel een noodoplossing.



Figuur 4-5: Kanaalprofiel (2)

Bij kanaalprofiel (2) is een damwand geplaatst en een taludoever aangebracht. Het onderwatertalud is verwijderd om zo het natte oppervlak te vergroten tot 603 m^2 . Hierbij kan gesteld worden dat het natte oppervlakte niet veel verschilt ten opzichte van kanaalprofiel (1). De h/d_s verhouding is 1,5 en is hetzelfde als in profiel (1). Een ander punt wat wel verschil geeft is de taludoever die op één meter onder water begint en loopt tot één meter boven de waterspiegel. Door het toepassen van een dergelijke oeverconstructie worden de golven grotendeels uitgedempt, waardoor een rustig vaarbeeld ontstaat. Het uitdempen van de golven op het talud komt door de relatieve korte golfperiode en de hoge golven, hoeveel procent teruggekaatst zal worden dient nog verder onderzocht te worden. Wel kan aangenomen worden dat het grootste gedeelte uitdempt. Doordat de waterdiepte gelijk is aan de eis van de minimum waterdiepte zal verder onderzoek dienen uit te wijzen of een dergelijke kanaaloever stabiel is. Door het aanbrengen van een taludoever, kan een natuurvriendelijke oever gecreëerd worden. Het kanaal krijgt met deze oplossing een ander beeld, en zal zo meer in het landschap integreren. Door de geringe lengte van de taludoever zal deze weinig ruimte innemen, met een taludhelling van 1:3 komt dit neer op een lengte van zes meter. De duurzaamheid is net als in kanaalprofiel (1) afhankelijk van de optredende erosie die waarschijnlijk de oeverconstructie kan ondermijnen, verder onderzoek dient uit te wijzen of deze erosie optreedt. De taludoever zal verdedigd worden met een bekleding die de golfaanval dient te weerstaan.



Figuur 4-6: Kanaalprofiel (3)

Kanaal profiel (3) lijkt in veel opzichten op kanaalprofiel (2). Het grote verschil met kanaalprofiel (2) is, dat de waterdiepte vergroot is en het natte oppervlak 751 m^2 is geworden. Hierin verschilt

dit ontwerp van de voorgaande profielen. De waterdiepte in het midden van het kanaal is gebaseerd op de vuistregel die ervan uitgaat dat bij een h/d_s verhouding van 1,9 de retourstroming geen invloed meer heeft op de bodem. ($1,9 \times 4 = 7,6$ meter waterdiepte)

Dit profiel heeft een onderwatertalud dat tegen de damwand aanligt. Het onderwatertalud dient bij de damwand verstevigd te worden met een bestorting. Dit dient de damwand te beschermen tegen hoge stroomsnelheden en uitspoeling van het talud. Wanneer blijkt dat het onderwatertalud op die diepte geen ontgronding oplevert, is een bestorting niet nodig. De oeverconstructie is hetzelfde als in kanaalprofiel (2). Het natte oppervlak is groter dan de minimale wens van Rijkswaterstaat. Maar binnen Rijkswaterstaat is verschillende keren gevraagd naar een dwarsprofiel waarbij de verwachting is dat er geen problemen optreden door ontgronding. Daarom is kanaalprofiel (3) opgenomen in het rapport, om zo onderzoek te doen naar de haalbaarheid van een dergelijk profiel. Door een profiel te ontwerpen dat geen of nauwelijks erosie geeft op de bodem van het kanaal, zal de oeverconstructie minder kans hebben om te falen. De duurzaamheid van dit profiel is dan ook groter.

Enkele punten op het gebied van de h/d_s verhouding in het verleden. Door de grotere diepte die toegepast is op het kanaal waren er geen problemen met de oeverconstructie. In het verleden (voor 1994) was het Amsterdam-Rijnkanaal (Noordelijke pand) bevaarbaar voor schepen met een diepgang van 3,30 meter, de kanaaldiepte was in die tijd 6,00 meter [Baars, 1991]. De h/d_s verhouding komt dan uit op 1,82. In het verleden zijn geen ontgrondingen geconstateerd met deze h/d_s verhouding. Na 1994 is de diepgang vergroot naar 4,00 meter, daarbij is de waterdiepte in het kanaal gelijk gebleven.

In het Betuwe pand zijn geen problemen geconstateerd hier is de h/d_s verhouding 1,71. Daarbij moet wel opgemerkt worden dat de schepen minder dicht langs de kant varen door de taludoever en dat de verkeersintensiteit lager is.

Door de minimale eis die Rijkswaterstaat stelt dat het kanaal een nat oppervlak van minimaal 600 m² dient te krijgen bij een breedte van 100 meter, komt de h/d_s verhouding op 1,5. In dit verslag wordt naar een antwoord gezocht of deze eis voldoet en of dit uitgangspunt van Rijkswaterstaat juist gekozen is.

In de nieuwe kanaalprofielen is geen rekening gehouden met het verwijderen van de oude damwanden en het eventueel hergebruik. Het verdient verder onderzoek om te kijken naar de mogelijkheid om de bestaande damwand tot één meter onder de waterspiegel door te drukken. Wanneer de bestaande damwand in die situatie voldoet, bestaat een mogelijkheid om een goedkoop alternatief te creëren. Het op die manier gebruiken van de bestaande damwand is natuurlijk afhankelijk van de staat en leeftijd van de huidige damwand. In deze studie wordt geen rekening gehouden met extra kosten zoals aankoop van extra grond, verleggen van wegen of nutsvoorzieningen.

In de multicriteria tabel zullen de varianten tegen elkaar afgewogen worden. De beste variant wordt verder uitgewerkt in de volgende hoofdstukken.

4.3 Multicriteria analyse

Na beschrijving van de verschillende varianten zullen de varianten met elkaar worden vergeleken. Door middel van een multicriteria-analyse wordt een afweging gemaakt tussen de verschillende varianten. Deze afweging leidt tot een voorontwerp van het kanaalprofiel. Om het belang van de verschillende criteria te onderstrepen is voor ieder criterium een weging toegepast.

4.3.1 Criteria

In de multicriteria-analyse worden verschillende criteria gebruikt. De criteria die gebruikt worden in de analyse zijn:

- Natte doorsnede van het kanaal;
- Uitdemping golven;
- Mogelijkheid tot aanleg natuurvriendelijke oevers;
- Stabiele oevers/ onderhoud;
- Duurzaamheid;
- Benodigde ruimte;
- Landschap;
- Veiligheid;
- Relatie met het water.

Het kanaalprofiel wordt getoetst op deze punten. Aan elk onderdeel zal een aantal punten toegekend worden inclusief een weegfactor.

4.3.2 Toepassing

In deze paragraaf zal een algemene multicriteria tabel gegeven worden waarna de criteria verder uitgewerkt worden, ook zal de wegingsfactor verder toegelicht worden evenals de punten toekenning. In bijlage 8 zijn nog twee andere multicriteria tabellen te vinden. Deze zijn opgesteld vanuit de visie van de gebruikers en de beheerder van het kanaal.

Criteria	weging (w)	variant 1		variant 2		variant 3	
		score (s)	(w x s)	score (s)	(w x s)	score (s)	(w x s)
Natte doorsnede van het kanaal A _c	3	1	3	1	3	3	9
Uitdemping golven	2	1	2	3	6	3	6
Mogelijkheid tot aanleg natuurvriendelijke oevers	2	1	2	3	6	3	6
Stabiele oevers/onderhoud	3	1	3	1	3	3	9
Duurzaamheid	3	1	3	1	3	3	9
Benodigde ruimte (aanleg)	3	2	6	1	3	1	3
Landschap	2	1	2	2	4	2	4
Veiligheid	3	1	3	1	3	3	9
Relatie met het water	1	1	1	3	3	3	3
Totaal			25		34		58
Procentueel (max. punten 63=100%)			41%		54%		92%
Totaal zonder weging		10		16		24	
<u>Weging</u> 1 = Neutraal 2 = Belangrijk 3 = Zeer Belangrijk		<u>Score</u> 1 = Ongunstig 2 = Gunstig 3 = Zeer gunstig					

Tabel 4-4: Algemene scoretabel kanaalprofiel.

Natte doorsnede van het kanaal (geen variatie in de breedte)

De natte doorsnede van het kanaal is belangrijk voor een goede afhandeling van de scheepvaart. De schepen zijn beter te besturen bij een grotere h/d_s verhouding. De breedte is vooral belangrijk voor de verkeersintensiteit. De breedte in de verschillende alternatieven blijft gelijk, omdat voor de scheepvaart geen extra breedte vereist is. Doordat de breedte vast staat kan alleen de waterdiepte variëren. Hoe groter het natte oppervlak hoe beter de bevaarbaarheid. En bij vergroting van het natte oppervlak zal de erosie verminderen.

Het natte oppervlak van het kanaal krijgt een weging van 3, omdat het natte oppervlak een belangrijke factor is in het verdere kanaalontwerp.

Variant (3) krijgt hier de meeste punten, omdat hier het natte oppervlak het grootst is. Het vaargedrag wordt hierdoor gunstig beïnvloedt. In variant (1) en (2) is het natte oppervlak gelijk aan elkaar, beide varianten voldoen aan de minimale eis van een nat oppervlak van 600m², en scoren daardoor gunstig.

Uitdemping golven

Door de scheepvaart worden golven gegenereerd, deze golven dempen voor een groot gedeelte uit op een talud. In kanalen zonder talud dempen deze golven niet uit waardoor zij hinderlijk zijn voor de scheepvaart (met name voor de kleinere schepen). De golven die opgewekt worden door de scheepvaart hebben een maximale golfhoogte van één meter en een korte golfperiode. Daardoor zal een groot gedeelte van de golven uitdempen, waardoor een rustig vaarbeeld ontstaat, dit is een wenselijke situatie.

De wegingsfactor bij het uitdempen van golven is van belang daardoor wordt er een weging 2 aan gegeven.

Variant (1) scoort niet hoog op dit criterium omdat golven tegen een verticale wand niet uitdempen maar gereflecteerd worden, waardoor een onrustig beeld ontstaat.

Bij variant (2) en (3) worden golven uitgedempt op het talud, deze varianten krijgen daardoor een hogere score.

Mogelijkheid tot aanleg natuurvriendelijke oevers

Hiermee wordt aangeduid dat waar mogelijk een natuurvriendelijke oever aangelegd kan worden, dit past binnen het beleid van Rijkswaterstaat om bij groot onderhoud deze mogelijkheid mee te nemen. De weging die meegenomen wordt voor deze oevers is belangrijk, omdat oevers bepalend zijn voor het aanzicht van het kanaal.

In variant (1) is het beeld hetzelfde als in de huidige situatie, hier is dus geen mogelijkheid voor een natuurvriendelijke oever en op dit criteria scoort (1) ongunstig. De oeverconstructie van (2) en (3) zijn gelijk aan elkaar en bieden de mogelijkheid tot aanleg van natuurvriendelijke oevers. Daardoor scoren (2) en (3) hoog.

Stabiele oevers/ Onderhoud

Het is van belang dat de oevers stabiel zijn en ze dat ook blijven voor de ontwerpperiode van 50 jaar. Het voortijdig falen van de oeverconstructie kan door erosie komen. Erosie wordt veroorzaakt door grote hydraulische belastingen bij de teen van de oeverconstructie. Een stabiele oever en onderhoud zijn belangrijke gegevens en hebben daardoor een weging 3 gekregen.

Variant (3) zal door de grote waterdiepte robuuster zijn dan varianten (2) en (1). Uit het verleden is gebleken dat een h/d verhouding zoals in variant (3) geen gevolgen heeft voor een oeverconstructie, hierdoor is variant (3) een zeer gunstig ontwerp en zal hoog scoren.

Bij elke variant zal jaarlijks onderhoud plaats vinden. De mate van onderhoud kan worden geschat. Een alternatief wat veel onderhoud vergt zal lager scoren dan een variant wat weinig onderhoud vergt.

Op het criterium onderhoud scoren kanaalprofiel (1) en (2) het laagst, doordat de oever een grotere kans heeft op falen dan bij kanaalprofiel (3). Kanaalprofiel 3 scoort hoog omdat het de kans op falen door erosie hier klein is. Bij variant (1) zal het onderhoudswerk voornamelijk baggeren zijn. Ook kan grond uitspoelen wanneer golven boven de damwand komen. Bij variant (2) zal naast het baggeren ook jaarlijks onderhoud aan de natuurvriendelijke oever gedaan moeten worden in de vorm van maaien van riet. Bij variant (3) zal op de natuurvriendelijke oever ook gemaaid worden, net zoals bij variant (2). Het baggerwerk is veel minder in deze variant omdat door de grotere waterdiepte geen tot nauwelijks sediment wordt verplaatst op de bodem. Bij variant (1) scoort hier gunstig, omdat hier alleen baggerwerk nodig zal zijn, variant (2) scoort ongunstig omdat deze het meest onderhoudswerk vraagt van de drie. Variant 3 scoort het hoogst omdat naar verwachting het onderhoudswerk alleen bestaat uit maaiwerk.

Duurzaamheid

Duurzaamheid van de constructie is van belang voor de levensduur van het kanaalprofiel. De duurzaamheid van de toegepaste materialen kunnen aangepast worden aan de levensduur die gesteld wordt voor het kanaalprofiel. Duurzaamheid is een belangrijke factor in het ontwerp en een robuust ontwerp dat minimaal 50 jaar voldoet krijgt dan ook een weging 3.

Variant (1) en (2) scoren op dit criterium gelijk, variant (3) scoort hoger op dit criterium want door het duurzame ontwerp zullen erosiekuilen naar verwachting niet tot nauwelijks optreden, waardoor een robuust kanaalprofiel gegarandeerd kan worden.

Benodigde ruimte

De ruimte die nodig is voor de aanleg van het nieuwe kanaalprofiel is de benodigde ruimte. Het uitvoeren van een nieuw kanaalprofiel dat breder is dan het huidige kanaalprofiel geeft verschillende problemen en kan het voortraject voor de werkelijke aanleg vertragen. Aan de westzijde van de onderzoekslocatie kan geen grote verbreding plaatsvinden omdat de onderhoudswegen en de spoorlijn dan in de knel komen. Kleine verbredingen tot maximaal 10 meter zijn te realiseren, en drukt maatschappelijk gezien minder zwaar op het ontwerp. De wegingsfactor voor de benodigde ruimte is 3, want de benodigde ruimte is een zeer belangrijk gegeven voor het ontwerp van een nieuw kanaalprofiel.

Variant (1) scoort het beste omdat hiervoor geen extra ruimte nodig is. Bij variant (2) en (3) is het ruimte gebruik gelijk, en groter dan in (1), daardoor scoren deze varianten lager.

Landschap

De term landschap geeft aan hoe de variant in het landschap past. Een kanaal wat mooi overgaat in het landschap is van belang voor de omgeving, omdat dit de leefbaarheid van het omliggende gebied verhoogt. Omdat leefbaarheid in een omgeving belangrijk is krijgt dit criterium een weging 2.

Bij variant (1) wordt het landschap doorsneden en is geen enkele relatie met het omliggende land, daardoor krijgt het een lage score. Bij varianten (2) en (3) wordt het landschap ook

doorsneden maar is door een mogelijke natuurvriendelijke oever aan te leggen het geheel goed in te passen in de omgeving, waardoor het een zeer gunstige score krijgt.

Veiligheid

Hiermee wordt bedoeld de veiligheid tegen overstromen, hiervoor is in het ontwerp van het kanaalprofiel de oeverconstructie het belangrijkste. Bij falen van de oeverconstructie bestaat een kans dat het dijklichaam ook faalt. Als de oeverconstructie bestaat uit een damwand kan door erosie de damwand falen en in het ergste geval het dijklichaam ook. Hierbij is het dus van belang dat de kans op falen van de oeverconstructie door erosie het kleinst is. De weging die dit criterium krijgt is zeer belangrijk en krijgt de waarde 3.

Relatie met het water

Met dit begrip wordt bedoeld de relatie tussen het water en de oever of het naastgelegen fietspad. Als recreanten dicht bij het water kunnen komen is de relatie met het water hoog. Bij een taludoever is de relatie met het water hoog. Een damwandconstructie belemmert de relatie met het water.

De weging die aan dit criterium wordt gegeven is neutraal 1, omdat de relatie met het water niet cruciaal is in het bepalen van het kanaalontwerp.

In variant (1) is de relatie met het water laag omdat de damwand die één meter boven het maaiveld uitsteekt dit belemmert, en krijgt daarom een lage score. Bij varianten (2) en (3) is een duidelijke relatie met het water waardoor deze varianten hoger scoren dan variant (1).

Conclusie

Variant (1) en (2) scoren laag ten opzichte van variant (3). Van variant (3) kan gezegd worden dat het op vele criteria hoog scoort. Hierbij kan gesteld worden dat in deze variant de meeste wensen vertegenwoordigd. Met een kosten benadering zal blijken welk alternatief de beste prijs kwaliteit verhouding heeft.

Wanneer geen weging toegepast wordt blijft variant (3) ook nog de beste variant. In de bijlage 8 is verder nog onderzoek naar verschillende invalshoeken gedaan. De score tabel is daarom aangepast vanuit het perspectief van de beheerder en vanuit de gebruikers. In alle gevallen is variant (3) het beste.

4.4 Aanlegkosten nieuw profiel

Door de grote lengte van het kanaal dient een afweging gemaakt te worden voor de kosten. De kosten voor de aanleg per strekkende meter oever mogen niet te hoog zijn in verband met de grote lengte van het kanaal.

De kosten zijn in de bijlage 6 verder uitgewerkt. Hier worden alleen de eindkosten per variant weergegeven. Deze kosten zijn de werkelijke kosten en hebben een bandbreedte van 35% en dienen alleen ter vergelijking van de varianten. Bij een verder onderzoek dient diepgaander op deze kosten ingegaan te worden. De kosten zijn allemaal per strekkende meter kanaal. Dus aanbrengen van een oeverconstructie aan beide zijden van het kanaal.

Om een goede vergelijking te maken zal het aantal punten dat in de score tabel gegeven is gedeeld worden op de kosten zodat een prijs per punt te berekenen is. De kosten in de onderstaande tabel zijn per strekkende meter kanaal.

Variant	Prijs	Punten	Euro per punt
1	€ 3195,75	26	€ 122,91
2	€ 4000,75	34	€ 117,66
3	€ 7234,47	58	€124,73

Tabel 4-5: Vergelijking kosten per punt

Hieruit blijkt dat variant (2) de laagste score geeft in Euro per punt en daardoor de goedkoopste variant is om verder uit te werken. Wel zal variant (3) op het gebied van erosie ook nog verder onderzocht worden om zo duidelijkheid te krijgen over de optredende erosie en de bijbehorende stabiliteit van de oevers.

Het is een globale kostenraming want er is alleen gebruik gemaakt van directe kosten voor de aanleg. Verder is geen rekening gehouden met het verwijderen van de huidige damwand inclusief gordingen en ankerstangen, omdat dit waarschijnlijk in alle gevallen hetzelfde is. Het transporteren en opslaan van uitgebaggerde grond is ook niet meegenomen. Ook zijn geen onderhoudskosten meegenomen voor een looptijd van 50 jaar.

5 Voorontwerp hydraulische belastingen

In dit hoofdstuk worden de verschillende hydraulische belastingen bepaald die door de scheepvaart worden gegenereerd. Hierbij is van belang meer inzicht te krijgen in de belastingen die ontstaan door het vaargedrag van de schippers. Om dit te visualiseren zal een maatgevende situatie beschreven worden waarbij twee schepen elkaar oplopen. In elke situatie is een bepaalde hydraulische belasting maatgevend, deze situaties zullen verder uitgewerkt en vergeleken worden, zodat de maatgevende hydraulische belasting bepaald kan worden. Om de belastingen te kunnen bepalen is een ontwerpschip nodig dit schip zal in de volgende paragraaf worden toegelicht. Daarna kunnen de belastingen bepaald worden. In de laatste paragraaf wordt de maatgevende hydraulische belasting bepaald voor het Betuwepand en de oude situatie, deze twee situaties kunnen als referentie dienen voor het nieuwe kanaalprofiel omdat in deze situaties geen problemen waren met het kanaal en de kanaaloevers.

5.1 Ontwerpschepen

Het Amsterdam-Rijnkanaal is geclassificeerd voor een VIb schip, deze eis verandert volgens de verwachting van Rijkswaterstaat voorlopig niet. De sluizen zijn maatgevend en de scheepvaart vraagt op dit moment nog niet om een grotere diepgang. In de tabel in bijlage 2 staan verschillende standaardschepen volgens de CEMT classificatie. Met deze grotere klassen schepen wordt in een eerste benadering gerekend om een inschatting te maken welke schepen maatgevend zijn. De ontwerpschepen zijn belangrijk voor de bepaling van de hydraulische belastingen in het kanaal. De hydraulische belastingen zoals waterspiegeldaling, retourstroom en de schroefstraalwerking van hoofd en boegschroef zullen onderzocht worden.

De maatgevende scheepscombinatie zal bestaan uit hooguit twee schepen. Voor twee of meer schepen zijn nauwelijks metingen gedaan in het verleden zodat validatie met de werkelijkheid niet gedaan kan worden. De uitkomsten van modellen met twee of meer schepen worden daarom onzeker.

Het Amsterdam-Rijnkanaal heeft een hoge verkeersintensiteit van 100.000 passages per jaar. Bij een hoge verkeersintensiteit komt het vaak voor dat schepen elkaar tegemoetkomen en oplopen. Er wordt daarom gezocht naar een maatgevende combinatie van schepen. Om een maatgevende scheepscombinatie te maken zal van de volgende type schepen onderzocht worden welke hydraulische belastingen ze veroorzaken.

Type schip	Afmetingen in meters		Vermogen hoofdschroef	Vermogen boegschroef
Va (M9)	135,00 x 11,40 x 3,50	geladen	2x 1000 kW	1x 500 kW
Vla (M10)	135,00 x 17,00 x 4,00	geladen	2x 1500 kW	1x 1000 kW
VIb (Vierbaksduwstel)	198,00 x 22,80 x 4.00	geladen	3x 2000 kW	1x 1000 kW

Tabel 5-1: Maatgevende schepen

Met deze schepen zal verder in het verslag gerekend worden. Deze schepen zorgen voor een hydraulische belasting die maatgevend is voor het nieuwe kanaalprofiel. Bijna de hele breedte van het kanaal is bevaarbaar voor de verschillende schepen die op het kanaal varen. Omdat er verschillende type binnenvaartschepen zijn, is er verschil in vaarsnelheid. Uit de verschillende type schepen (tabel 5-1) zal een bepaalde combinatie gekozen worden die voorkomt op het Amsterdam-Rijnkanaal. Aan de hand van de maatgevende hydraulische belasting gegenereerd

door één of twee schepen wordt het maatgevend schip of de maatgevende scheepscombinatie bepaald.

5.2 Situaties op Amsterdam-Rijnkanaal

Op het Amsterdam-Rijnkanaal zijn veel schepen die elkaar oplopen en tegemoetkomen. Er bevinden zich dus meerdere schepen tegelijk in één dwarsprofiel. Deze schepen beïnvloeden elkaar en er is interactie tussen de schepen en het vaarwegprofiel. Om een beeld te krijgen van de hydraulische belastingen zal de maatgevende situatie ten gevolge van oplopende schepen beschreven worden. Deze kan verder onderverdeeld worden in drie subsituaties die verder beschreven zullen worden in deze paragraaf.

Uit de as van het kanaal varen

Schepen varen om verschillende redenen uit de as van het kanaal. Hoe groter de verkeersintensiteit op het kanaal, hoe vaker de schepen uit de as van het kanaal varen. Door de grote diepte vlak bij de damwand kunnen grote schepen relatief dicht langs de oeverconstructie varen. Hierdoor ontstaan hogere belastingen en daar waar de ruimte tussen schip en oever het kleinst is, zal de grootste retourstroom en waterspiegeldaling ontstaan bij het uit de as varen.



Figuur 5-1: In deze figuur is duidelijk te zien dat het schip uit de as van de vaarweg vaart

Oplopen

Oplopen op het Amsterdam-Rijnkanaal is een situatie die frequent voorkomt, hierbij moet rekening gehouden worden met snelheidsverschillen. Een schip dat 5 km/uur sneller vaart dan het op te lopen schip, kan het ander schip zonder problemen oplopen. Een voorwaarde die gebruikt wordt op kanalen met een hoge verkeersintensiteit is dat schepen elkaar mogen oplopen met een maximale snelheidsvermindering van 30%. Wanneer twee schepen elkaar oplopen zal dit een versterking van de retourstroom tussen de schepen geven. Hierdoor treedt een extra waterspiegeldaling op, in deze situatie is de retourstroom het grootst. Oplopende schepen zijn maatgevend voor bepaling van de retourstroom.

Tegemoetkomen

Als schepen elkaar tegemoetkomen ontstaat er een situatie waardoor de waterspiegel tussen de schepen verhoogt. Hierdoor worden de schepen naar de oever gedrukt, de retourstroom tussen het schip en de oever is hierbij groter dan tussen de schepen onderling. De retourstroom in het kanaal is bij deze manoeuvre dan kleiner dan in een situatie waarbij de schepen oplopen.

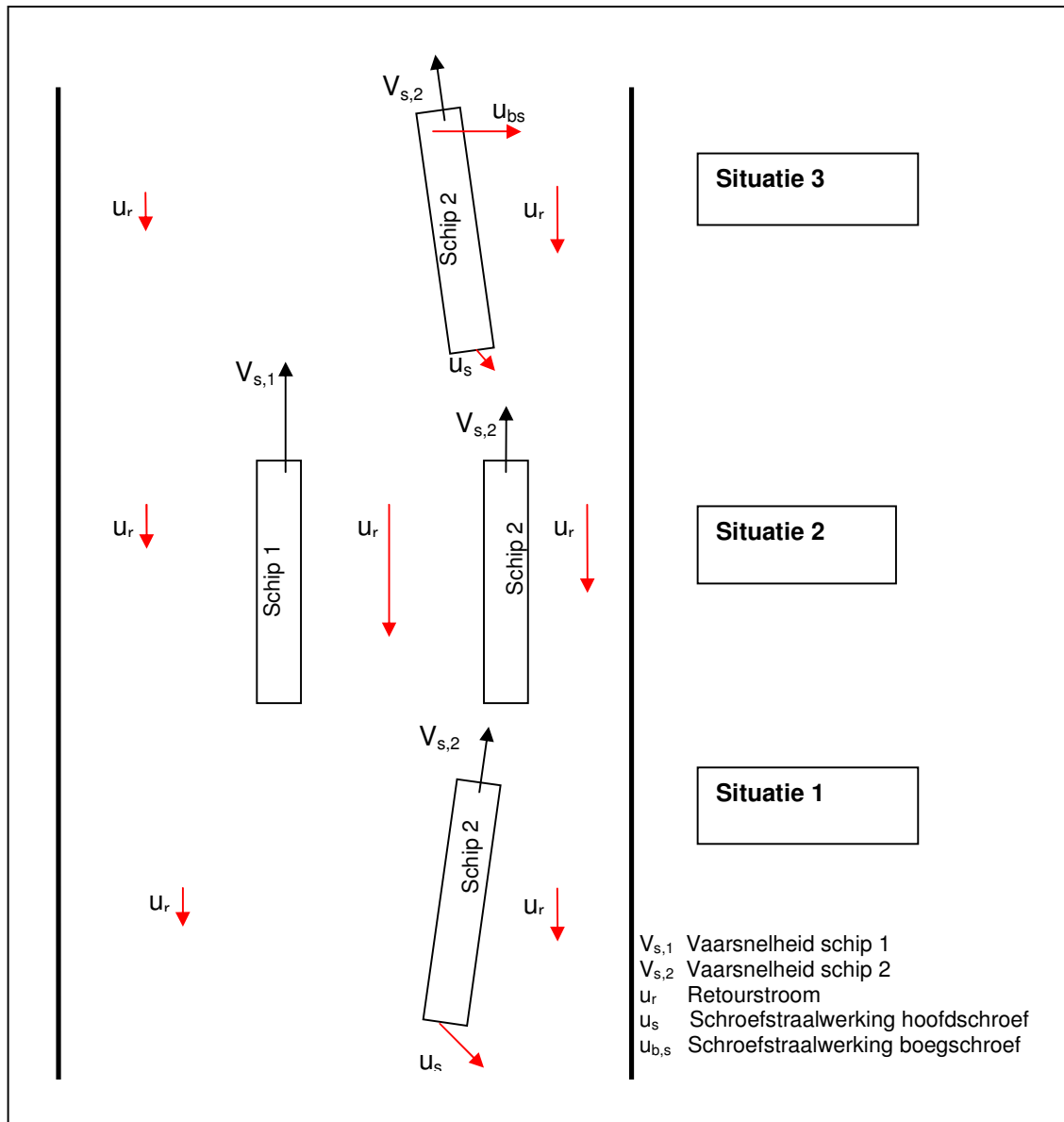
Oeverzuiging

In een situatie waarbij een schip excentrisch in het kanaal vaart, zal door de optredende waterspiegeldaling tussen het schip en de dichtstbijzijnde oever het schip verder naar de kant gedrukt worden. Hierdoor wordt de retourstroom hoger en neemt de waterspiegeldaling verder toe. Dit fenomeen wordt oeverzuiging genoemd. In principe verschilt oeverzuiging dus niet met de zuiging tussen de schepen die optreedt bij het oplopen van schepen.

Door oeverzuiging kunnen ongelukken gebeuren, bijvoorbeeld als een schip op de automatische piloot vaart. De automatische piloot reageert op een draaiing van het schip. Door oeverzuiging zal een schip parallel naar de kant toe verplaatsen. Dit registreert de computer niet. Wanneer de schipper niet ingrijpt, zal het schip tegen de oever gedrukt worden. Dit komt het meest bij een kanaalprofiel voor waar een damwandoever is toegepast. Bij een taludoever zal dit minder voorkomen omdat door het schuine talud meer water tussen het schip en de oever is. Oeverzuiging zal bij een taludoever dus minder optreden dan bij een kanaal met een bakprofiel.

Maatgevende situatie op het kanaal

In figuur 5-2 is de maatgevende situatie bepaald waarbij ervan uitgegaan is dat schip 1 schip 2 oploopt. Deze situatie wordt gezien als een maatgevende situatie voor de hydraulische belastingen. Door de schaalvergroting zullen steeds grotere schepen elkaar ook vaker oplopen. Verder vaart schip 2 dicht langs de kant waarbij het wisselend zijn hoofdschroef en boegschroef gebruikt. De maatgevende situatie is een situatie waarbij schip 2 plaats maakt zodat schip 1 kan oplopen.



Figuur 5-2: Oplopen van schepen

Situatie 1

In situatie 1 gaat schip 2 ruimte maken voor schip 1 dat harder vaart en wil passeren. Hierbij zal schip 2 gebruik maken van de hoofdschroef. De schroefstraal staat door een roerhoek naar de kant gericht. In deze situatie wordt onderzoek gedaan naar de invloed van de schroefstraalwerking gegenereerd door de hoofdschroef, voor verdere berekeningen zie paragraaf 5.3.

Situatie 2

In situatie 2 zijn de schepen op gelijke hoogte met elkaar, hierdoor wordt het nat dwarsoppervlak verkleind en daardoor zal de hydraulische belasting gegenereerd door de retourstroom maatgevend zijn. Verder onderzoek naar de retourstroom in deze situatie is vereist, zie hiervoor paragraaf 5.4.

Situatie 3

In de derde situatie is schip 1 schip 2 voorbij en gaat schip 2 weer naar het midden van het kanaal. Om de boeg van het schip in positie te krijgen zal de schipper gebruik maken van de boegschroef. In de grote nieuwe schepen is dit een stuurrooster wat onderin het schip zit. Hierbij dient onderzocht te worden wat de stroming is ten gevolge van de boegschroef, de uitwerking van de boegschroef vindt plaats in paragraaf 5.5.

Deze drie verschillende situaties zullen verder uitgewerkt worden. Zodat per situatie gerekend wordt aan de retourstroom en de waterspiegeldaling, en de schroefstraalwerking gegenereerd door de hoofd- en boegschroef.

5.3 Situatie 1

In situatie 1 gaat schip twee ruimte maken voor het passerende schip één. Het schip zal uitwijken zodat een ander schip kan passeren, eventueel verminderd het schip nog vaart. Voor deze manoeuvre gebruikt de schipper de hoofdschroef. Hierbij is de schroefstraal naar de oeverconstructie gericht. In deze situatie is de snelheid van het uitwijkende schip niet hoog. Dit is een relevant gegeven, bij een lage scheepssnelheid heeft de schroefstraal een grotere invloed.

Om een bovengrens te bepalen van de schroefstraalwerking worden de volgende gegevens aan gehouden:

- Klasse Vla schip (M10) Rijnmaxschip;
- 90% motorvermogen;
- Recht uittredende schroefstraal:
 - Bij een waterdiepte van 6,00 meter, kanaalprofiel (1) en (2);
 - Bij een waterdiepte van 7,60 meter, kanaalprofiel (3);
- Het schip vaart 32 meter uit de kant;
- Vaarsnelheid max. $0,7 V_{lim}$;
- Waterspiegeldaling meenemen van het varende schip (0,5 meter).

De hoofdschroef bevindt zich dicht bij de bodem als gevolg van de grote diepgang en de geringe waterdiepte, waardoor de invloed van de schroefstralen groot is. Bij duwstellen is dit minder het geval dan bij een geladen Rijnmaxschip. Dit komt doordat de een duwstel een veel kleinere diepgang heeft dan een Rijnmaxschip. Hierdoor is een Rijnmaxschip maatgevend t.o.v. een duwstel.

Voor de schroefstralen is de volgende situatie maatgevend: Rijnmaxschip met een diepgang van 4,0 meter met 2 scheepsschroeven van elk 1500 kW. Een binnenvaartschip vaart niet altijd op vol vermogen, daarom wordt in berekeningen 90% van het motorvermogen aangehouden om zo een bovengrens te bepalen. De waterspiegeldaling wordt ook meegenomen in de berekeningen van een varende schip. Deze waterspiegeldaling is gesteld op 0,50 meter.

Vergelijkingen die nodig zijn voor het berekenen van de schroefstraalwerking. (Volgens [Handleiding DIPRO, 1997]).

Voor de berekening van de schroefstraal voor één schroef, wordt in vergelijking 5-1 de uitstroomsnelheid net achter de schroef bepaald. Deze uitstroomsnelheid is bepaald bij een stilliggend schip. Afhankelijk van de bekende parameters kan de bovenste of de onderste formule van 5-1 gebruikt worden.

$$u_0 = 1,6nD_p\sqrt{K_T}$$

$$\text{of } u_0 = C_3 \left(\frac{f_p P_s}{\rho_w D_p^2} \right)^{0.33} \quad (5-1)$$

u_0	Uitstroomsnelheid hoofdschroef	[m/s];
n	Aantal omwentelingen	[o.p.m];
D_p	Schroefdiameter	[m];
K_T	Stoot coëfficiënt	[-];
C_3	Coëfficiënt voor type schroef straalbuis 1,17 en 1,43 voor open schroeven	[-];
f_p	Percentage van geïnstalleerd vermogen	[%];
P_s	Geïnstalleerd vermogen	[kW];
ρ_w	Soortelijke dichtheid van water	[kg/m ³].

Wanneer de uitstroomsnelheid direct achter de schroef bekend is, kan de stroomsnelheid bepaald worden in de straalas. Om deze stroomsnelheid te bepalen wordt vergelijking 5-2 gebruikt, hierin is de stroomsnelheid in de straalas op een aantal meters (x) achter het schip te bepalen.

$$u_{axis} = 1,95u_0 \left(\frac{D_p}{x} \right) \quad (5-2)$$

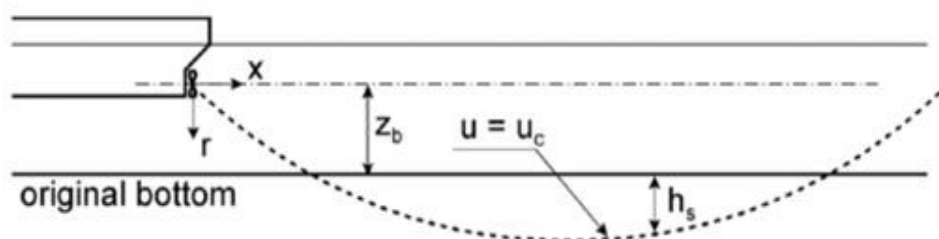
u_{axis}	Stroomsnelheid in as hoofdschroef op afstand x achter het schip	[m/s];
x	Afstand achter schip in as hoofdschroef	[m].

Met formule 5-2 kan de stroomsnelheid bepaald worden op een afstand achter het schip. Omdat veelal de snelheid op de bodem van belang is zal door het gebruik van formule 5-3 de snelheid op de bodem bepaald kunnen worden. Dit kan door nu de nieuwe parameter r in te voeren.

$$u_{x,r} = u_{axis} e^{(-15,4r^2 / x^2)} \quad (5-3)$$

r	Afstand loodrecht op as van de hoofdschroef	[m];
$u_{x,r}$	Stroomsnelheid op afstand x,r	[m/s].

In de vergelijking 5-3 moeten de variabelen x en r zo gekozen worden dat de maximale stroomsnelheid op de bodem bepaald wordt. Of x en r kunnen zo gekozen worden dat de stroming berekend wordt aan de voet van een oeverconstructie.



Figuur 5-3: Schroefstraalwerking [Schiereck,2006]

In figuur 5-3 is een schip te zien en de parameters x en r die in de voorgaande formules aangegeven zijn. In de figuur is met de stippellijn de belasting van de schroefstraal aangegeven. In de figuur staat de parameter z_b voor de afstand van de straalas tot aan de bodem en geeft h_s de maximale ontgrondingskuil aan. In de vergelijking $u=u_c$ staat de u voor de maximale optredende stroomsnelheid en de u_c voor de kritische snelheid van een deeltje op de bodem. Wanneer u en u_c aan elkaar gelijk zijn, zal geen ontgroning meer optreden. Het is nu van belang om de maximale uitstroomsnelheid te bepalen. Dit kan met de formule zoals die gegeven is in 5-4.

$$u_{\text{single}} = \max.(u_{x,r}) \quad (5-4)$$

u_{single} Maximaal optredende stroomsnelheid bij gebruik van één schroef,
op locatie x,r [m/s];

Met bovenstaande formules is de stroomsnelheid bepaald die hoort bij een stilliggend schip met één schroef. Binnenvaartschepen hebben vaak meer dan één schroef daardoor is het van belang om te weten wat de uitstroomsnelheid bij meerdere schroeven is. Dit kan door middel van formule 5-5 berekend worden. Wanneer een schip uitgerust is met meerdere schroeven mogen de vermogens per schroef bij elkaar opgeteld worden. Door de volgende formules te gebruiken:

$$\begin{aligned} u_{\text{max}} &= u_{\text{single}} && \text{bij 1 schroef} \\ u_{\text{max}} &= u_{\text{single}} \times \sqrt{2} && \text{bij 2 schroeven} \\ u_{\text{max}} &= u_{\text{single}} \times 2 && \text{bij 3 schroeven} \end{aligned} \quad (5-5)$$

In formule 5-5 zijn de stroomsnelheden bepaald voor een stilliggend schip. Om nu te bepalen wat de stroming is bij een varend schip wordt gebruik gemaakt van de volgende formule. Hierbij is $u_{\text{max, stilligend}}$ de waarde uit vergelijking 5-5 en V_s is de scheepsnelheid.

$$\begin{aligned} u_{\text{max, varend}} &= u_{\text{max, stilligend}} - 0,5V_s \\ (u_{\text{max, varend}} &\geq 0) \end{aligned} \quad (5-6)$$

$u_{\text{max, varend}}$ Maximale stroomsnelheid bij een varend schip [m/s];
 u_{max} Maximale stroomsnelheid bij een stilliggend schip [m/s];
 V_s Vaarsnelheid schip [m/s].

De maximale optredende stroomsnelheid op de bodem veroorzaakt door een varend Rijnmax schip met een snelheid van $0,7 \times V_{\text{lim}}$ is te zien in figuur 5-4. De grote variatie in vermogen is gekozen door de schaalvergroting in de binnenvaart. De verwachting is dat de vermogens nog verder zullen toenemen, daarom is in de grafiek een grote spreiding rondom de 1500 kW weergegeven.

Voorbeeld berekening met een waterdiepte van 5,6 meter

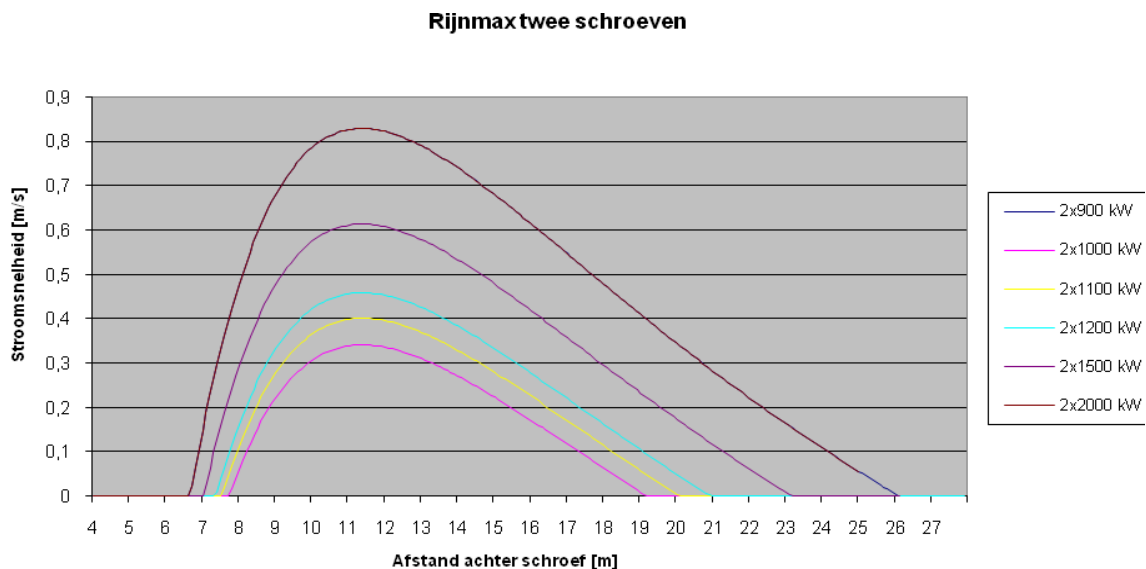
Voor het maken van de grafieken zijn de volgende waarden gebruikt:

f_p	0,7 voor grafiek 5-4 en 0,9 [-] voor grafiek 5-5
P	Verschillende waarden zie legenda [kW]
h	5,6 [m]
z	0,5 [m]
V_{lim}	4,47 [m/s]
V_s	0,7 V_{lim}

De parameter z is hier de waterspiegeldaling die meegenomen wordt in de berekening. Bij bepaling van de plaats van de schroef zal deze van de waterdiepte afgetrokken worden.

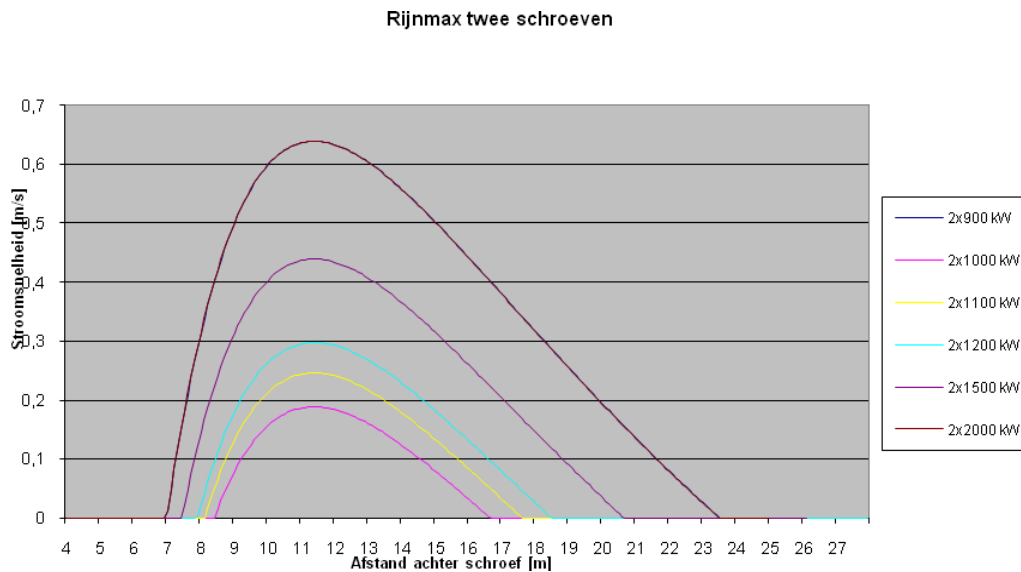
In deze grafieken is gebruik gemaakt van een waterdiepte van 5,60 m, omdat met deze waterdiepte de meeste vermogens gevisualiseerd kunnen worden, zoals te zien is in de figuren 5-4 en 5-5. Door de toename van de motorvermogens is duidelijk te zien dat dit invloed heeft op de stroomsnelheid.

Wanneer verder gerekend zal worden met een waterdiepte van 6,00 m of een grotere waterdiepte, zijn schepen met een kleiner vermogen en gelijke diepgang niet meer zichtbaar in de grafiek, omdat de stroomsnelheid dan naar 0 m/s gaat.



Figuur 5-4: Schroefstraalwerking bij $f_p = 0,9$ en $h = 5,60$ meter.

Om een indicatie te krijgen van de stroomsnelheden in relatie met de ondergrond wordt de kritieke stroomsnelheid gegeven van een zanddeeltje van $2 \cdot 10^{-4}$ m a $4 \cdot 10^{-4}$ m, dit bedraagt ongeveer 0,1 m/s. Uit de figuren 5-4 en 5-5 is direct te zien dat de optredende snelheid groter is dan de kritieke stroomsnelheid. Daardoor kan transport van bodemmateriaal plaatsvinden.



Figuur 5-5: Schroefstraalwerking bij $f = 0,7$ en $h = 5,60$ meter.

Bij een hoger gebruik van het vermogen is de belasting van de schroefstraalwerking groter dan bij een lager gebruik. Dit is duidelijk te zien in de bovenstaande grafieken.

Gegevens voor bepaling van schroefstraalwerking voor de verschillende varianten.

- f_p 0,9 [-];
- P 1500 [kW] en 2000 kW;
- z 0,5 [m];
- V_{lim} 4,47 [m/s];
- V_s $0,7 V_{lim}$.

Kanaalprofiel (1) en (2)

De schroefstraalwerking in kanaalprofiel variant (1) en (2) met een waterdiepte van $h=6,00$ meter is te zien in tabel 5-2.

Type schip	$u_{max, bodem, stilliggend}$ [m/s]	$u_{max, varende, (0.7 V_{lim})}$ [m/s]
Rijnmaxschip 1500 kW	1,85	0,26
Rijnmaxschip 2000 kW	2,00	0,44
Rijnschip ($d_s=3,5$)	1,50	0

Tabel 5-2: Getalwaarde voor maximale schroefstraalwerking $h=6,00m$.

In deze situatie is te zien dat bij een toename van het motorvermogen van 25% er een toename is in de maximale stroomsnelheid van 69%.

Kanaalprofiel (3)

De schroefstraalwerking in kanaalprofiel variant (3) is te zien in tabel 5-3, de waterdiepte is hier $h=7,60$ meter.

Type schip	$U_{\max \text{ bodem, stilliggend}}$ [m/s]	$U_{\max, \text{varend}, (0.7 V_{\text{lim}})}$ [m/s]
Rijnmaxschip 1500 kW	1,10	0
Rijnmaxschip 2000 kW	1,12	0
Rijnschip ($d=3,5$)	0,98	0

Tabel 5-3: Getalwaarde voor maximale schroefstraalwerking $h=7,60\text{m}$.

Met behulp van de berekeningen is vastgesteld dat bij een waterdiepte groter dan 6,50 meter geen schroefstraalwerking meer optreedt door het varende maatgevende schip met het maximale vermogen van 1500 kW. De mogelijkheid bestaat nog wel dat bij deze 6,5 m waterdiepte de stilliggende schepen door schroefstraalwerking de bodem kunnen aantasten, maar dit valt buiten de scope van dit onderzoek.

Conclusie

Uit voorgaande blijkt dat de relatie met de diepte parameter veel verschil uitmaakt in de werking van de schroefstraal op de bodem. Bij een waterdiepte van 5,60 meter blijkt dat de maatgevende schepen nog invloed hebben op de bodem, de h/d_s verhouding bij deze waterdiepte is 1,4. Als kanaalvarianten (1) en (2) verder onderzocht worden, blijkt dat de invloed van de schroefstraal aanzienlijk minder wordt ($h/d_s=1,5$). Voor een varende Rijnschip ($d_s=3,5$) is de stroming op de bodem zelfs nul. Hieruit blijkt dat de schaalvergroting invloed heeft op de maximale schroefstraalwerking en dat daarom op grotere diepte de schroefstraalwerking nog van invloed is. In kanaalprofiel variant (3) ($h/d_s=1,9$) is de stroming op de bodem voor alle schepen nul, zelfs bij een vermogen van 2000 kW.

Terugkoppeling naar hoofdstuk 4

In hoofdstuk 4 zijn bij de waterdiepte de h/d_s verhoudingen besproken. Hieruit bleek dat bij een h/d_s verhouding tot 1,3 geen schroefstraalwerking optreedt. Uit de berekening blijkt dat de vermogens dusdanig toegenomen zijn dat de schroefstraalwerking invloed krijgt tot een h/d_s verhouding van 1,5. Hieruit blijkt dat vergroting van de motorvermogens toch wel van invloed is op de maximale schroefstraalwerking op de bodem.

5.4 Situatie 2

In deze paragraaf zal situatie 2 verder onderzocht worden op de retourstroming en de waterspiegeldaling. Hiervoor zijn de scheepsafmetingen en de kanaalprofielen van belang. Daarna volgt een uitleg over de uitgangspunten van DIPRO, wat gevolgd wordt door de uitvoer van DIPRO. Daarna wordt voor de maatgevende situatie de stroomsnelheden gegeven.

Scheepsafmetingen

In DIPRO zijn de volgende scheepsafmetingen ingevoerd, deze staan vermeld in tabel 5-4.

Type schip	Afmetingen [m]	A _s [m ²]
1. 4-baks duwstel <i>Vlb BII-4</i>	198x22,9x4,0	91,6
2. Rijnmax <i>Vla M10</i>	135x17x4,0	68,0
3. Verlengd Groot Rijnschip <i>Va M9</i>	135x11,4x3,5	39,9
4. Combi 1 en 2 <i>Vlb en Vla</i>	198x39,9x4,0	159,6

Tabel 5-4: Invoer scheepsgegevens.

Kanaalafmetingen

In tabel 5-5 zijn de verschillende afmetingen voor de verschillende kanaal varianten ingevoerd. Hierbij is ook het huidige kanaal ingevoerd. Het huidige kanaal kan als referentie dienen voor een situatie waar op dit moment erosie optreedt.

Type kanaal	Nat oppervlak [m ²]	Breedte op waterlijn [m]	Waterdiepte [m]
1. Huidige gebroken kanaalprofiel	554	100	6,00
2. a. Volledig bakprofiel (1)	600	100	6,00
b. Damwand en taludoever (2)	603	106	6,00
3. Damwand en taludoever (3)	751	100	7,60

Tabel 5-5: Invoer kanaalprofiel.

Verskil in nat oppervlak geeft een verschil in retourstroom en waterspiegeldaling. Variant (1) verschilt maar 3 m² met variant (2) uit de varianten studie, de berekende waterspiegeldaling en retourstroming zijn voor beide situaties gelijk. Voor variant (2) en (3) is wel een aparte berekening nodig voor de steenbekleding op het talud.

Uitgangspunten en randvoorwaarden DIPRO

Voor de berekeningen van de retourstroom en de waterspiegeldaling wordt in dit deel van het onderzoek het eendimensionale rekenprogramma DIPRO gebruikt, het programma is gebaseerd op de methode van Schijf. Dit programma is geschikt voor het rekenen met varende schepen in een beperkte vaarweg, het is ontwikkeld om de aantasting van vaarwegprofielen te bepalen en met name om de oeverconstructies te dimensioneren.

DIPRO geeft op twee verschillende manieren een betrouwbaar antwoord. Als eerste geeft DIPRO een betrouwbaar antwoord als formule 5-7 geldig is. DIPRO geeft ook op een afstand van vijf maal de scheepsbreedte betrouwbare uitkomsten voor de waterspiegeldaling en de retourstroom. Het schip dient dan wel in de as van het kanaal te varen. Deze vuistregel is niet te gebruiken in het Amsterdam-Rijnkanaal omdat het kanaal hiervoor te smal is.

Formule 5-7 kan gebruikt worden voor het Amsterdam-Rijnkanaal en zal verder uitgewerkt worden. Het programma geeft voor waarden onder de 10 betrouwbare uitkomsten, dit is het geval voor het Amsterdam-Rijnkanaal. Wanneer de waarden boven de 10 uitkomen, zullen de uitkomsten minder nauwkeurig worden. De verhouding tussen het nat dwarsoppervlak van het kanaal en nat scheepsoppervlak dient aan de volgende eis te voldoen [Verheij, 2008]:

$$\frac{A_c}{A_s} < 10 \quad (5-7)$$

A_c Nat dwarsoppervlak kanaal [m];
 A_s Nat midscheeps oppervlak [m].

Voor het huidige kanaal is deze waarde 8,01 bij voor een Rijnmaxschip (zie 5-8) daarbij zijn de waarden genomen voor het maatgevende schip en het huidige kanaalprofiel. Voor een Groot Rijnschip is de waarde groter dan 10 alle andere schepen die ingevoerd zijn in DIPRO hebben een waarde kleiner dan 10.

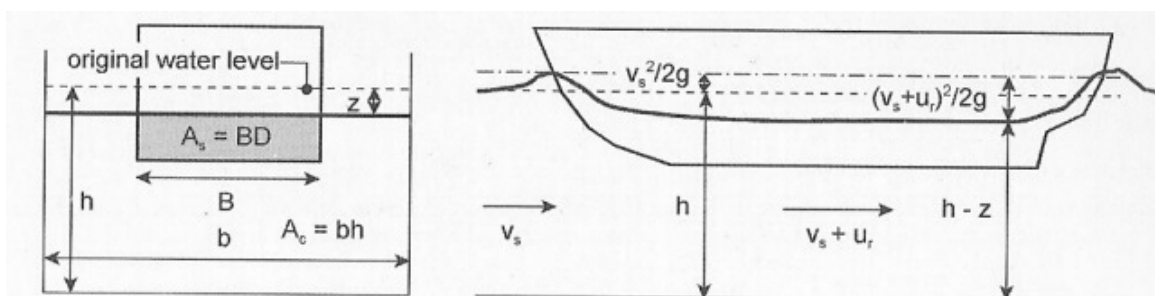
$$\frac{A_c}{A_s} = 8,01 \quad (5-8)$$

A_c 554 [m²];
 A_s 17,00x4,00 = 68 [m²] (Rijnmaxschip).

Met DIPRO wordt een eerste schatting gemaakt voor de waterspiegeldaling en de retourstroom, Enkele randvoorwaarden die gelden bij het gebruik van het programma zijn [Handleiding DIPRO,1997]:

- Er mag maar één schip tegelijkertijd in de dwarsdoorsnede aanwezig zijn;
- Het schip vaart in het midden van het kanaal;
- Het schip vaart met een constante snelheid;
- Het kanaal is uniform;
- De retourstroom en de waterspiegeldaling zijn gelijkmatig verdeeld over het kanaal;
- De inzinking van het schip is gelijk aan de waterspiegeldaling;
- Er wordt geen rekening gehouden met trim van het schip;
- Er is geen energieverlies door schuifspanning;
- Het assenstelsel loopt mee met het schip.

Omdat het assenstelsel meeloopt met het schip kan het model ook uitgevoerd worden met een stilstaand schip met een stroming langs/onder het schip. Dat maakt voor het stroomprofiel niet uit. Als er rekening gehouden wordt met deze randvoorwaarden kan gebruik gemaakt worden van de eendimensionale benadering.

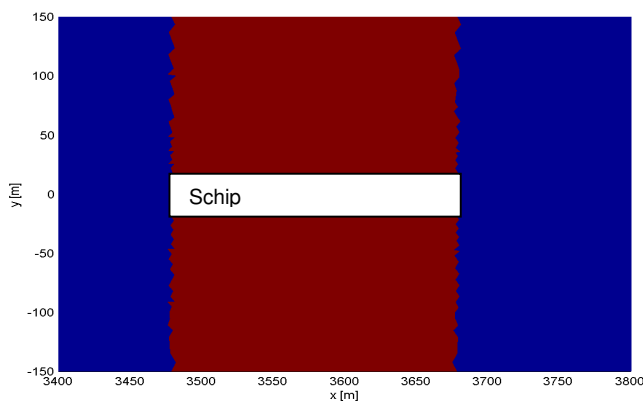


Figuur 5-6: Definities eendimensionale benadering [Schierck, 2004]

In bovenstaande figuur zijn verschillende definities te zien die gebruikt worden voor de eendimensionale DIPRO berekening.

Omdat schepen elkaar oplopen is het van belang om te weten welke retourstroom dit veroorzaakt. In DIPRO kan de berekening met maar één nat scheepsoppervlak uitgevoerd worden. Om toch twee schepen tegelijk in te voeren is het mogelijk om het nat dwarsoppervlak van beide schepen bij elkaar op te tellen en zo als één schip in te voeren in DIPRO. Dit geldt alleen voor oplopende schepen, omdat in deze situatie de retourstroom in dezelfde richting werkt. De oplopende situatie zal onderzocht worden, omdat deze maatgevend is zie figuur 5-2. Met DIPRO wordt de retourstroom en waterspiegeldaling bepaald. Er kan in DIPRO gerekend worden in de veilige modus (overall veiligheidsfactor) en in de nauwkeurige modus (geen veiligheidsfactor). Dit wordt aangegeven met modus I (veilig) en modus II (nauwkeurig).

De uitkomsten van DIPRO worden gegeven in een diepte-gemiddelde snelheid die rondom het hele schip gelijk is bij schepen die in de as van het kanaal varen. Door de gebiedsgemiddelde uitvoer (rode vlak) is de waterspiegeldaling ook rondom het hele schip gelijk.



Figuur 5-7: Gebiedsgemiddelde uitvoer [Verheij, 2007]

In figuur 5-7 is de gebiedsgemiddelde uitvoer te zien zoals DIPRO die berekent. De diepte-gemiddelde snelheid en de waterspiegeldaling is overal gelijk in de rode vlakken die evenwijdig langs het schip liggen. De stroming onder het schip wordt buiten beschouwing gelaten. Het witte vlak stelt het schip voor en de blauwe vlakken de ongestoorde toestand.

De formules voor het bepalen van scheepsnelheid en retourstroom zijn in de eendimensionale benadering afhankelijk van de waterdiepte en diepgang van het schip, maar niet van de lengte van het schip. Schepen met een andere lengte maar dezelfde breedte hebben een V_{lim} en een retourstroom die gelijk aan elkaar zijn.

Uitgevoerde berekeningen met DIPRO

Om de retourstroom en de waterspiegeldaling te berekenen zijn in DIPRO de kanaal- en scheepsafmetingen ingevoerd. Hieronder volgt de uitvoer van de retourstroom, waterspiegeldaling en de grenssnelheid van verschillende combinaties. In eerste instantie is gerekend met de modus veilig, hierdoor zal de retourstroming overschat worden. De vaarsnelheid van de schepen zal in eerste instantie gezet worden op $0,9 V_{lim}$ deze waarde zal in werkelijkheid niet optreden bij geladen schepen, maar voor de berekening van de retourstroming geeft het een bovengrens aan.

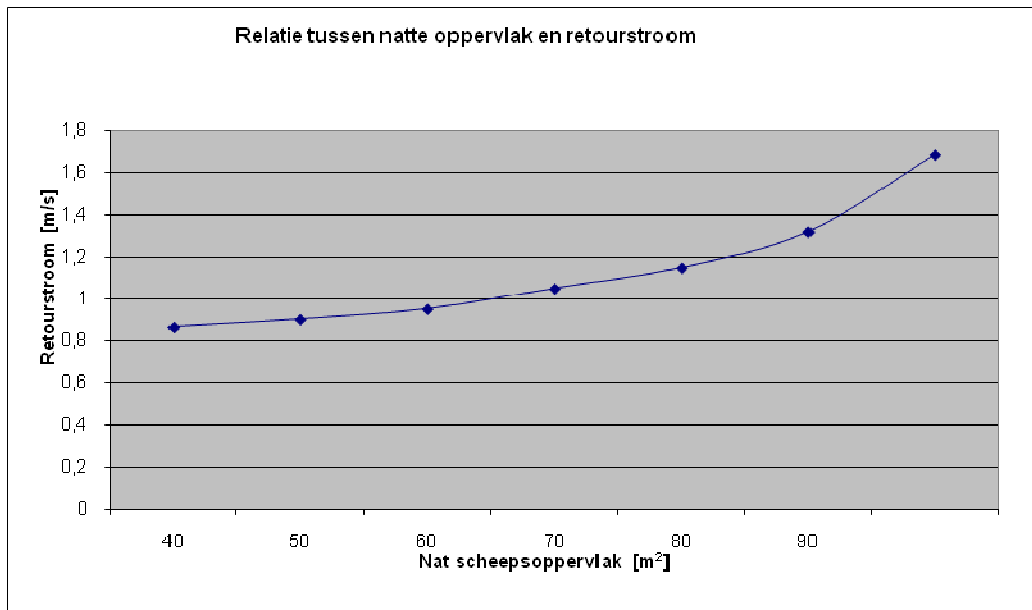
Scheeps type	Type kanaal	V_{lim} [m/s]	u_r [m/s]	Z_{max} [m]	A_s/A_c [-]
Huidig kanaal					
1	1	3,996	1,321	0,632	0,17
2	1	4,469	1,150	0,593	0,11
3	1	5,329	0,863	0,525	0,07
4	1	2,899	1,687	0,631	0,29
Variant (1) en (2)					
2	2	4,751	1,056	0,575	0,11
4	2	3,287	1,563	0,638	0,27
Variant (3)					
2	3	5,689	1,069	0,694	0,09
4	3	4,196	1,592	0,801	0,21

Tabel 5-6: Uitvoer DIPRO modus veilig, $0,9 V_{lim}$.

In tabel 5-6 zijn de verschillende kanaalprofielen en scheepstypen met elkaar vergeleken. Aan de verhouding A_s/A_c kan gezien worden hoeveel ruimte de scheepvaart inneemt (blockagefactor). Deze factor geeft een verhouding aan die gebruikt wordt om de grenssnelheid te bepalen en ook de retourstroom en waterspiegeldaling. Zie ook [Verheij, 2008].

Duidelijk is te zien dat het grootste nat scheidingsoppervlak de hoogste retourstroom genereert, verhouding A_s/A_c is groot. Opmerkelijk is dat de retourstroom bij scheepstype vier in variant (1) en (2) nagenoeg gelijk is aan de retourstroom in variant (3). De oorzaak hiervan is de hogere grenssnelheid die het scheepstype kan varen in profiel (3), deze ligt ongeveer 22% hoger dan in variant (1) en (2). Wanneer de vaarsnelheid in (3) gelijk is aan (1) en (2) zal dus de retourstroom beduidend lager liggen. Dit is eventueel mogelijk door bijvoorbeeld snelheidsbeperkingen voor de grotere schepen in te voeren, de huidige vaarsnelheid op het Amsterdam-Rijnkanaal is 5,0 m/s (18 km/uur). In deze tabel is te zien dat de vaarsnelheid bij een groter kanaal fors toeneemt, dit geldt in principe alleen voor de grootste schepen omdat de kleinere schepen niet boven de maximale snelheid van 18 km/uur mogen varen. Hierdoor gebruiken de kleinere schepen minder van hun motorvermogen en zullen daardoor minder brandstof verbruiken.

In figuur 5-8 is de relatie tussen de retourstroom en het natte oppervlak weergegeven uit tabel 5-6.



Figuur 5-8 : A_s (huidige kanaal) ten opzichte van u_r , let op modus veilig, $V_s = 0,9 V_{lim}$.

In figuur 5-8 is duidelijk te zien dat een groter nat scheepsoppervlak (bij een gelijk blijvend nat kanaaloppervlak) een hogere retourstroom genereert. Optellen van het nat oppervlak van twee schepen is gedaan bij het laatste punt in de grafiek, waar de grootste retourstroom ontstaat. De grafiek is gemaakt voor de huidige situatie.

Betuwepand waar geen erosie optreedt

Ter vergelijking met Betuwepand is de A_s/A_c factor 0,23. (Scheepstype 4 en kanaalprofiel van 681 m^2) Een opmerking bij deze factor is op zijn plaats, de verkeersintensiteit op het Betuwepand is de helft lager dan op het Noordelijke pand, en op het Betuwepand treedt geen erosie op. Door een lagere verkeersintensiteit zal het vaargedrag van de schepen anders zijn, grote schepen zullen meer in het midden van het kanaal varen en daardoor minder erosie aan de oever en het onderwatertalud veroorzaken.

Het natte oppervlak is in het Betuwe pand 20% groter dan in de huidige situatie op het Noordelijke pand, ook is het natte oppervlak nog 12% groter dan de minimale wens van Rijkswaterstaat (600 m^2).

De h/d_s verhouding in het Betuwe pand is 1,71 ten opzichte van 1,5 op het Noordelijke pand.

Conclusie

Uit tabel 5-6 en grafiek 5-8 blijkt dat de maatgevende scheepscombinatie een 4 baks duwcombinatie is waarbij een Rijnmax schip oploopt. Er dient opgelet te worden dat bij het optellen van de twee natte oppervlakten de nauwkeurigheid lokaal achteruit gaat, dit houdt in dat de diepte-oppervlakte-gemiddelde snelheid een globale snelheid is, maar dat de lokale retourstroom tussen de twee schepen een andere waarde kan krijgen.

Variant kanaalprofiel	Scheepscombinatie	V_{lim} [m/s]	stroomsnelheid [m/s]
Variant 3	Rijnmax en duwstel 4baks	4,2	1,60
Variant 1 en 2	Rijnmax en duwstel 4baks	3.2	1,56

Tabel 5-7: Maatgevende retourstroom in verschillende varianten

In tabel 5-7 is te zien dat de stroomsnelheid bij variant (3) hoger is dan bij variant (1) en (2), dit komt door de hogere V_{lim} .

5.5 Situatie 3

In deze situatie wordt de hydraulische belasting door de boegschroef uitgewerkt. Het schip vaart dicht langs de kant en zal weer naar het midden van het kanaal willen draaien. Voor deze manoeuvre wordt de boegschroef gebruikt.

Boegschroeven hebben in de loop van de tijd een ontwikkeling doorgemaakt. In het verleden werden boegschroeven vaak uitgevoerd als een tunnel of dwarsbuissysteem. In nieuwbouwschepen komt steeds vaker een stuurrooster voor. Het verschil tussen deze twee is dat een stuurrooster effectiever in gebruik is tijdens het varen. Een stuurrooster zit onder in het schip en blaast dus zijn jet direct naar de bodem. Dit geeft een directe waterbeweging richting de bodem. Een tunnel of een dwarsbuissysteem zit aan de zijkant van het schip en genereert een straal horizontaal en loodrecht op het schip. Dit is voor de bodem minder belastend. Bij het dicht langs de kant varen kan door beide systemen erosie optreden aan de voet van de damwand.

De verschillende typen boegschroeven zijn in de DIPRO handleiding als volgt gedefinieerd:

Type I	Intrekbare draaibare schroef onder schip;
Type II	Kanalen systeem met uitstroming door zijkant schip;
Type IIIa	Systeem met horizontale schroef en uitstroming in vlak van het schip;
Type IIIb	Systeem volgens centrifugaalpomp met uitstroming in vlak van het schip.

Schippers gebruiken in sommige situaties tijdens het varen hun boegschroef, zoals bij dwarswind of bij passeren van schepen en bij het manoeuvreren in speciale situaties. Het gebruik van de boegschroef verschilt per schip en schipper. Een schroef die uitstroomt in het vlak van het schip kan gezien worden als maatgevend. Alle schroeven zijn het meest effectief bij lage vaarsnelheden of stilliggende schepen. Het schroeftype III schijnt door verschillende schippers ook gebruikt te worden bij hogere vaarsnelheden, dit type schroef wordt veel toegepast in de nieuwe grotere klasse schepen. Voor een berekening van een varend schip zal dus onderzoek gedaan worden naar het laatste type boegschroef (type III). Voor een berekening van de schroefstraalbelasting door een boegschroef worden de volgende uitgangspunten gegeven:

- Loodrecht uittredende straal;
- Schroeftype III;
- Vaarsnelheid van $0,7V_{lim}$;
- Percentage gebruikt vermogen 100%;
- Rijnmaxschip met 1000 kW geïnstalleerd vermogen voor de boegschroef;
- Afstand schip tot aan de oever 17 meter.

Met deze uitgangspunten zal een bovengrens bepaald worden voor de uitstroomsnelheid van de boegschroef. Met de berekende formules wordt er een overschatting gedaan ten op zicht van de gemiddelde waarden die gemeten zijn [Meijer en Verheij, 1994]. Om de uitstroomsnelheid bij een boegschroef te bepalen worden in [DIPRO 3.02n, 1997] de volgende formules gebruikt:

Voor een loodrecht uittredende straal (scheepsvast assenstelsel)

$$u_{bs} = (u_x^2 + u_y^2)^{0,5} \quad (5-9)$$

u_{bs}	Schroefstraalsnelheid aan de oever bij een boegschroef	[m/s];
u_x	Stroomsnelheid boegschroef in x-richting	[m/s];
u_y	Stroomsnelheid boegschroef in y-richting	[m/s].

De waarden u_x en u_y kunnen met de volgende formules bepaald worden:

$$u_x = u_m \cos \theta_1 - V_s \quad (5-10)$$

$$u_y = u_m \sin \theta_1 \quad (5-11)$$

u_m	Stroomsnelheid in de straalas aan de oever	[m/s];
θ_1	Hoek waaronder de straal de oever bereikt	[°];
V_s	Snelheid schip	[m/s].

In de mode nauwkeurig wordt gerekend voor u_m :

$$u_m = \left(1,0 \cdot c_{oever} \cdot \alpha_u^{-1} + 0,8(1 - \alpha_u^{-1})k_1k(\alpha_u)\frac{D_0}{\xi_{bs}} \right) \cdot u_0 \quad (5-12)$$

Voorwaarde $\xi_{bs} > k_1k(\alpha_u)D_0$ anders $u_m = u_0$

c_{oever}	Invloed type vaarwegoever bij excentrisch varen	[-];
α_u	Stroomsnelheidsverhouding bij boegschroeven	[-];
k_1	Invloed vaarwegbegrenzing op lengte kernzone	[-];
$k(\alpha_u)$	Theoretische dimensieloze lengte van de kernzone	[-];
D_0	Effectieve diameter uitstroomopening boegschroef	[m];
ξ_{bs}	Afstand langs straalas tot locatie waar de straal de oever raakt	[m].

Parameters voor verdere bepaling stroomsnelheden boegschroef type III

$$\tan \theta_1 = 0,38 \alpha_u^{0,85} \left(\frac{x_{bs}}{D_0} \right)^{-0,62}$$

$$\alpha_u = \frac{u_0}{u_1} \quad u_0 = \zeta 1,15 \left(\frac{10^3 P_{bs}}{\rho_w D_0^2} \right)^{0,33} \quad u_1 = V_s + \bar{u}_{r,schip}$$

$$x_{bs} = \left(\alpha_u^{-2,24} \left(\frac{r_{bs}}{D_0} \right)^{2,63} \right) D_0 \quad \text{Eis: } x_{bs} \leq L_s, \text{ Als } x_{bs} > L_s \text{ dan geen belasting door } u_{bs} \text{ op de oever.}$$

$$D_{bs} = 0,060 \cdot P_{bs}^{0,5} \quad D_0 = 1,0 D_{bs} \quad \zeta = 0,9$$

x_{bs}	Afstand in x-richting vanaf uitstroomopening boegschroef tot waar de schroef straal de opening raakt	[m]
u_0	Axiale uitstroomsnelheid direct achter de boegschroef	[m/s]
u_1	Stroomsnelheid naast schip bij een boegschroef n scheepsvast assenstelsel	[m/s]
ζ	Energieverliesfactor bij boegschroeven	[-]
P_{bs}	Toegepast vermogen boegschroef	[kW]
r_{bs}	Kortste afstand van as boegschroef tot oeververdediging	[m]
D_{bs}	Diameter boegschroef	[m]
$\bar{u}_{r,schip}$	Gemiddelde retourstroomsnelheid bij varend schip	[m/s]

Bij onbekende T_{bs} : $T_{bs} = T_v - 0,5 D_{bs} - 0,02$ T_{bs} bekend dan geldt: $T_{bs} > 0,0$ $T_v > T_{bs} + 0,5 D_{bs}$

Voor k_1 geldt:

$$k_1 = 1,22 - 0,13 \alpha_u \quad (\text{eis } k_1 \geq 0,56, \text{ anders } k_1 = 0,56)$$

$k(\alpha_u)$ voor type boegschroef II of III:

$$k(\alpha_u) = 6,2 \left(1 - \left(\frac{\alpha_u}{40,05} + 1 \right)^{-2,75} \right)$$

Waarde voor ξ_{bs} is:

$$\xi_{bs} = \frac{r_{bs}^2}{4 x_{bs}} \ln \left(\sqrt{1 + \left(\frac{2 x_{bs}}{r_{bs}} \right)^2} + \frac{2 x_{bs}}{r_{bs}} \right) + \frac{r_{bs}}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{2 x_{bs}}{r_{bs}} \right)^2}$$

voor c_{oever} geldt:

1,0 bij damwand als vaarwegoever
1,0 + y/b_w bij taludoever met voorwaarde $c_{oever} \leq 1,2$

In de verdere berekening krijgen de parameters de waarden:

Vermogen boegschroef	P_{bs}	1000	[kW]
Rendementsverlies	ζ	0,9	[-]
Diepgang schip bij boeg	T_v	4	[m]
Lengte schip	L_s	200	[m]
Vaarsnelheid	V_s	2	[m/s]
Retourstroom	u_r	1,68	[m/s]
Afstand tot oever/bodem	r_{bs}	2	[m]

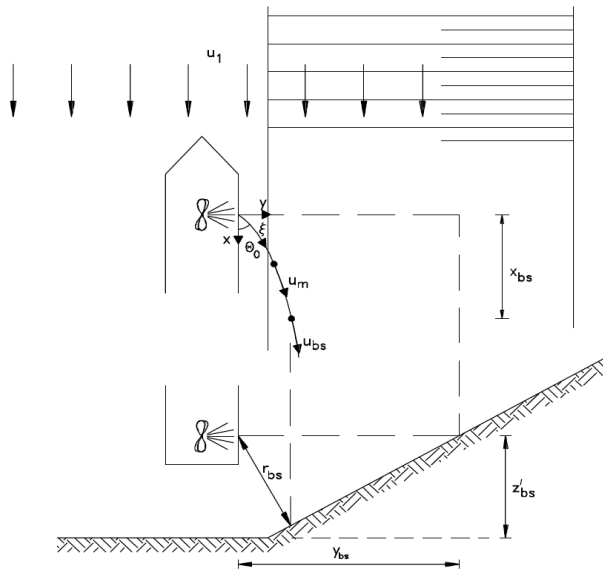
Deze parameters zijn representatief voor de maatgevende situatie van het boegschroefgebruik.

Uitvoer berekening boegschroef

Uit de berekening volgt de stroomsnelheid van de boegschroef. De stroomsnelheid van de boegschroef wordt dan $u_{bs} = 2,07$ m/s. Dit is een zeer hoge belasting, maar de hoek (θ_1) waaronder deze belasting werkt is heel klein, ongeveer 0,47 graden. Hierdoor ligt de boegschroefstraal eigenlijk dicht tegen de bodem van het schip aan en zal daardoor geen tot nauwelijks invloed hebben op de bodem en oeverconstructie.

De afstand van de as van de schroef tot aan de oeverconstructie is groter dan de afstand tot de bodem, daardoor is de verwachting dat de stroomsnelheid aan de oever minder is dan op de

bodem. Door nu voor r_{bs} de waarde 24,5 meter in te vullen (17 meter vanaf wal tot zijkant schip + $\frac{1}{2}$ scheepsbreedte) wordt $u_{bs} = 0$ m/s.



Figuur 5-9: Definities boegschroef

In figuur 5-9 is duidelijk te zien dat bij een kleine hoek θ_1 de schroefstraalwerking tegen de scheepswand aanligt.

Conclusie

Uit berekening volgt dat boegschroefgebruik geen invloed heeft op de bodem en oeverconstructie. Dit klopt met de verwachting dat gebruik van boegschroef bij varende schepen geen invloed heeft.

Uit de berekening volgt dat ruwweg gesteld kan worden dat de schroefstraalwerking geen invloed heeft boven een scheepssnelheid van 1 m/s. Hierbij wordt de hoek θ_1 namelijk zo klein, dat de schroefstraal tegen de scheepshuid aanligt. En daardoor oefent deze geen invloed uit op de bodem of een oeverconstructie.

Alleen bij stilliggende schepen en hele lage vaarsnelheid, waarbij het schip dicht bij de oeverconstructie ligt kan de boegschroefstraal invloed krijgen op de bodem en oeverconstructie.

5.6 Vergelijking drie situaties

In deze paragraaf worden de verschillende situaties (uit de eerdere paragrafen) en varianten met elkaar vergeleken, hieruit kan dan een maatgevende hydraulische belasting bepaald worden.

In de tabellen 5-8 en 5-9 zijn de maximale hydraulische belastingen gegeven die berekend zijn in de vorige paragrafen. Door deze met elkaar te vergelijken zal de maatgevende situatie en de maatgevende hydraulische belasting bekend worden.

Kanaalprofiel variant (1) en (2)			
	Situatie 1 [m/s]	Situatie 2	Situatie 3 [m/s]
Hoofdschroef ($0,7 V_{lim}$)	0,63	0,63	0,63
V_{lim}	4,03 [m/s]	3,28 [m/s]	3,87 [m/s]
Retourstroom ($0,9V_{lim}$)	1,26 [m/s]	1,56 [m/s]	1,26 [m/s]
Waterspiegeldaling ($0,9V_{lim}$)	0,64 [m]	0,64 [m]	0,66 [m]
Boegschroef	Wordt niet gebruikt	Wordt niet gebruikt	0

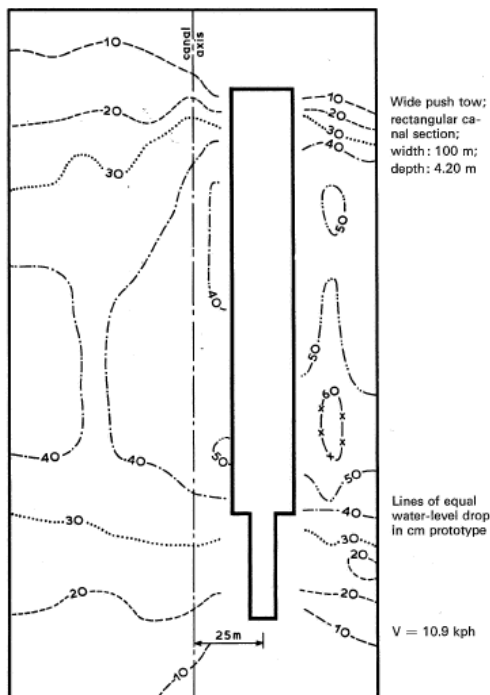
Tabel 5-8: Maximale hydraulische belasting variant (1) en (2)

Kanaalprofiel variant (3)			
	Situatie 1 [m/s]	Situatie 2	Situatie 3 [m/s]
Hoofdschroef ($0,7 V_{lim}$)	0	0	0
V_{lim}	4,93 [m/s]	4,20[m/s]	4,73 [m/s]
Retourstroom ($0,9V_{lim}$)	1,27 [m/s]	1,60[m/s]	1,26 [m/s]
Waterspiegeldaling ($0,9V_{lim}$)	0,78 [m]	0,80 [m]	0,80 [m]
Boegschroef	Wordt niet gebruikt	Wordt niet gebruikt	0

Tabel 5-9: Maximale hydraulische belasting variant (3)

Uit deze twee tabellen blijkt dat de retourstroom het grootst is in variant 3, Opvallend is dat de retourstroom weinig veranderd bij grotere diepte. Dit hangt direct samen met de vaarsnelheid die toeneemt bij een groter nat oppervlak bij profiel (3), waardoor de diepte-oppervlakte gemiddelde retourstroom ongeveer gelijk blijft.

Omdat de belasting bij de teen van de oeverconstructie van belang is, is een diepte-oppervlakte gemiddelde retourstroom niet nauwkeurig genoeg. Daarom dient verder onderzoek gedaan te worden naar de diepte-gemiddelde retourstroom.



Figuur 5-10: Uitvoer van een 2D meting.

Een verdere ontwikkeling naar een 2D model zal een beter beeld geven voor de diepte-gemiddelde retourstroom. Dit zal in het volgende hoofdstuk verder uitgewerkt worden, ook zal daar een berekening voor de erosie gedaan worden.

Een voorbeeld van een 2D uitvoer is hiernaast te zien, het plaatje is gebaseerd op een meting, [WL 144 publicatie]. De waterspiegeldaling wordt weergegeven rondom een 4 baksduwstel dat niet in het midden van het kanaal vaart. Hierbij is goed te zien dat de waterspiegeldaling over de gehele lengte van het schip varieert. Bij een eendimensionale berekening is dat wel het geval en dit is daardoor een nauwkeurigere benadering van de werkelijkheid. Een 2D benadering van de werkelijkheid geeft dus op ieder punt rondom het schip een dieptegemiddelde snelheid en is daardoor nauwkeuriger dan een 1D berekening.

5.7 Vergelijkingswaarden

In dit rapport is al verschillende malen gesproken over het Betuwepand en de oude situatie op het Noordelijke pand (diepgang 3,30m). Bij deze twee verschillende situaties komt naar voren dat er geen problemen optreden. Om deze twee situaties te kunnen vergelijken met het nieuwe kanaalprofiel zal de maatgevende hydraulische belasting (retourstroom) vergeleken worden. Het huidige kanaalprofiel wordt ook meegenomen, omdat hiervan bekend is dat het ontgroning oplevert.

De verkeersintensiteit is op het huidige Noordelijke pand nagenoeg gelijk gebleven. Uit tabel 3-2 kan geconcludeerd worden dat de verkeersintensiteit in het verleden iets hoger was dan in de huidige situatie. De verkeersintensiteit op het Betuwepand is lager, daarmee dient rekening gehouden te worden met de interpretatie van de hydraulische belastingen.

	Type kanaalprofiel	Nat oppervlak [m ²]	Waterdiepte [m]	Max. diepgang [m]	h/d _s [-]
Betuwepand	trapezium vorm	681	Gemiddeld 6,85	4,00	1,71
Noordelijke pand Oude situatie	gebroken bakprofiel	554	Voor damwand 4,00 In het midden 6,00	3,30	1,81
Huidige situatie Noordelijke pand	gebroken bakprofiel	554	Voor damwand 4,00 In het midden 6,00	4,00	1,50

Tabel 5-10: Verschillende kanaalprofielen

Om deze verschillende kanaalprofielen te kunnen vergelijken zijn dezelfde type schepen gebruikt als bij de berekening van de maatgevende retourstroom.

Betuwe pand						
Type schip	A_s [m ²]	A_c [m ²]	V_{lim} [m/s]	$V_s (=0.7V_{lim})$ [m/s]	u_r [m/s]	Z_{max} [m]
1. <i>Vlb</i>	91,60	681	4,28	3,00	0,71	0,49
2. <i>Vla</i>	68,00	681	4,85	3,40	0,57	0,46
4. <i>(1 en 2)</i>	159,60	681	3,49	2,45	0,90	0,50

Tabel 5-11: Betuwepand $d_s=4,00m$

In de oude situatie en de huidige situatie is het type kanaal gelijk, maar de diepgang is in de huidige situatie vergroot van $d_s=3,30m$ naar $d_s=4,00m$.

Noordelijke pand oude situatie						
Type schip	A_s [m ²]	A_c [m ²]	V_{lim} [m/s]	$V_s (=0.7V_{lim})$ [m/s]	u_r [m/s]	Z_{max} [m]
1. <i>Vlb</i>	75,57	554	4,32	3,02	0,71	0,33
2. <i>Vla</i>	56,10	554	4,91	3,43	0,58	0,32
4. <i>(1 en 2)</i>	131,67	554	3,51	2,46	0,91	0,34

Tabel 5-12: Noordelijk pand oude situatie $d_s=3,30m$.

Noordelijke pand huidige situatie						
Type schip	A_s [m ²]	A_c [m ²]	V_{lim} [m/s]	$V_s (=0.7V_{lim})$ [m/s]	u_r [m/s]	Z_{max} [m]
1. <i>Vlb</i>	91,60	554	4,00	2,80	0,79	0,34
2. <i>Vla</i>	68,00	554	4,64	3,25	0,64	0,33
4. <i>(1 en 2)</i>	159,60	554	3,21	2,18	1,01	0,34

Tabel 5-13: Noordelijk pand huidige situatie $d_s=4,00m$.

In de tabellen 5-11 t/m 5-13 is te zien dat de retourstroom in het Betuwepand ($d_s=4,00m$) en in de oude situatie ($d_s=3,30$) nagenoeg gelijk zijn aan elkaar. In de huidige situatie is de retourstroom ten opzichte van de oude situatie toegenomen met ongeveer 11%. De huidige situatie heeft de laagste vaarsnelheid.

Betuwepand heeft een h/d_s verhouding 1,71 en de oude situatie heeft een h/d_s verhouding van 1,81. Opmerkelijk is dat de retourstroom in beide situaties gelijk zijn. Dit heeft te maken met het groter natte oppervlak in het Betuwepand.

Uit bovenstaande tabellen kan geconcludeerd worden dat een retourstroom die gelijk is aan de retourstroom in het Betuwepand en de oude situatie geen probleem opleveren. Met dit gegeven dient rekening gehouden te worden in de verdere ontwikkeling van de retourstroom in hoofdstuk zes.

6 Maatgevende hydraulische belasting

In dit hoofdstuk zal verder onderzoek gedaan worden naar de maatgevende belasting. In het vorige hoofdstuk is bepaald dat de retourstroom een maatgevende hydraulische belasting geeft. Deze maatgevende hydraulische belasting is met een eendimensionaal model berekend (DIPRO). Het doel is om met een 2D model een gedetailleerder beeld van de retourstroom en waterspiegeldaling geven dan in het 1D model. In dit hoofdstuk wordt de maatgevende hydraulische belasting in een 2D model voor één en twee schepen bepaald. Voor de simulaties zal gebruik gemaakt worden van Delft3D.

In de eerste paragraaf zal een gedeelte van Delft3D beschreven worden, waarna de invoer en opbouw van het model beschreven zullen worden. Daarna het valideren van Delft3D met de uitkomsten van het programma DIPRO voor één schip. Hierna wordt aangenomen dat het model ook situaties met twee schepen goed weergeeft. Dit is onzeker omdat validatie voor twee schepen nooit is gedaan. Het is nu dan mogelijk om met twee schepen te modelleren en daarvan de uitkomsten te presenteren. De maximale retourstroom die optreedt bij twee varende schepen, wordt gebruikt in de berekening van de optredende erosie. Zodat in kanaalprofiel (2) en (3) onderzocht kan worden wat de optredende erosie is. Deze uitspraak van de optredende erosie bepaalt mede de toepassing van kanaalprofiel (2) of (3).

Doelstelling

In dit hoofdstuk zal voornamelijk ingegaan worden op:

- Een 2D model maken waarin de primaire waterbeweging op een willekeurig punt rondom een schip weergegeven wordt;
- In het 2D model een situatie modelleren waarbij twee schepen oplopen, om zo inzicht te krijgen in de retourstroom rondom twee schepen;
- Een uitspraak doen over de mogelijke optredende erosie in de maatgevende situatie.

De bovenstaande uitgangspunten zijn bepalend voor het verder modelleren met het Delft3D programma.

6.1 Beschrijving modelonderzoek Delft3D

In dit onderzoek zal gebruik gemaakt worden van het programma Delft3D. In het verleden is met Delft2D-rivers (voorloper Delft3D) een model gemaakt van een varend schip in een kanaal. In dat onderzoek is ook de primaire waterbeweging onderzocht in kribvakken [Kazi, 1998]. Voor het programma Delft3D wordt gekozen omdat in het verleden is gebleken dat de primaire waterbeweging goed te modelleren is in Delft2D-rivers.

In Delft3D zal een 2D model gebruikt worden waarbij op elk willekeurig punt een dieptegemiddelde snelheid bepaald kan worden. De dieptegemiddelde snelheid blijft een benadering, omdat in werkelijkheid de snelheid richting de bodem afneemt. De retourstroom die met de methode van Schijf berekend wordt geeft over een oppervlak een dieptegemiddelde snelheid, terwijl in het 2D model op elk willekeurig punt een dieptegemiddelde snelheid bepaald kan worden.

Lange golfmodel

Delft3D is een programma dat gebaseerd is op de lange golftheorie. Dit houdt in dat in de verticaal geen snelheden ontstaan en dat in de verticaal de waterdruk bepalend is. Bij een berekening waarbij in de verticaal snelheden ontstaan die opgelost dienen te worden dient

gebruik gemaakt te worden van een korte golfmodel. Men is bezig om Delft3D aan te passen om zo ook met korte golven in 3D te kunnen rekenen. Het rekenen in 3D zal verder niet meegenomen worden in deze modellering, omdat in Delft3D het niet- hydrostatische rekenen nog in ontwikkeling is, en nog niet beschikbaar is voor dit onderzoek. Bij het modelleren met een snelheid die richting de bodem afneemt krijgt men een 3D benadering. De beschikbaarheid van dergelijke modellen hangt af van metingen die nodig zijn om zo een 3D simulatie te kunnen valideren. In dit rapport wordt Delft3D gebruikt om een 2D model te maken.

Benodigde nauwkeurigheid

De uitvoer van één schip in Delft3D wordt vergeleken met de uitvoer van één schip in DIPRO, dit is feitelijk de enige mogelijkheid om het model te valideren. Met het modelleren zal de methode om in Delft3D te modelleren overgenomen worden uit [Kazi, 1998].

De verhouding tussen de tijdstap en gridgrootte is bepalend voor een stabiel of onstabiel numeriek schema.

Om een stabiel en nauwkeurig schema te krijgen is het nodig dat aan de (Courant Friedrichs Levy) CFL conditie voldaan wordt. Deze wordt in de user manual voor Delft3D-Flow als volgt gedefinieerd:

$$CFL = \frac{\Delta t \sqrt{gh}}{\min(\Delta x, \Delta y)} < 10 \quad (6-1)$$

Δt	Tijdstap	[s]
g	Gravitatie	[m/s ²]
h	Waterdiepte	[m]
Δx	Tijdstap in x-richting	[m]
Δy	Tijdstap in y-richting	[m]

Hierbij is de tijdstap in seconden en de gridsize in meters. Om een stabiel model te maken dient de tijdstap en de gridsize zo gekozen te worden dat de CFL conditie niet hoger is dan 10. Voor stabiliteit en nauwkeurigheid is het van belang dat de CFL conditie veel kleiner is dan 10. In het gebruikte model is de tijdstap als volgt gekozen:

Tijdstap is 0.005 minuten (0,3 s), de gridsize is in x en y richting gelijk en gesteld op 3,33 meter, de waterdiepte is 6,00 meter. Met deze gegevens komt de CFL conditie op 0,7 [-].

Het Amsterdam-Rijnkanaal heeft een vaste waterstand en het kanaal bestaat uit zoetwater, zonder grote dichtheidsverschillen. Dit houdt in dat met Delft3D een 2D berekening gemaakt kan worden. De uitvoer van het model mag daarom in dieptegemiddelde waarden weergegeven worden.

Verder is er geen rekening gehouden met de wrijving die de damwanden veroorzaken (*Wall roughness*), in Delft3D is dit aangegeven door de *Slip condition* op *Free* te zetten.

De nauwkeurigheid van het 2D model hangt af van de uitkomsten van het programma DIPRO. Alle situaties met één schip in de vaarweg kunnen vergeleken en gevalideerd worden met DIPRO. Wanneer deze uitvoer overeenkomt met de retourstroom en de waterspiegeldaling in DIPRO, wordt aangenomen dat het model ook met twee schepen tegelijkertijd in het model goede resultaten geeft. Voor de situatie met twee schepen is geen materiaal beschikbaar om het model te valideren.

Dicht bij het schip zal de uitkomst van Delft3D niet helemaal goed zijn vooral bij de boeg en de achterstevan is de uitkomst discutabel. Drukverschillen zorgen voor een niet-hydrostatische

situatie en dus zijn de resultaten onjuist. Voor de stroming precies onder het schip geldt dat onbekend is of deze juist is of niet, data om hierover een uitspraak te kunnen doen ontbreken. De waarden die Delft3D geeft onder het schip kunnen dan ook niet gevalideerd worden. In het verleden [Kazi, 1998] is gebleken dat Delft3D acceptabele waarden geeft voor de primaire waterbeweging tussen het schip en de oever.

Beperkingen in Delft3D

Andere zaken die rondom een varend schip optreden kunnen niet allemaal gemodelleerd worden, dit heeft te maken met de beperkingen van het model.

Het modelleren van de secundaire waterbeweging is niet mogelijk. Omdat Delft3D een model is voor lange golven, kunnen scheepsgolven niet gemodelleerd worden. Scheepsgolven zijn namelijk korte golven.

Doordat het Delft3D programma in 2D met maar één laag rekent kan in de verticaal geen uitwisseling zijn in verticale snelheden. Op plaatsen waar deze snelheden in werkelijkheid zullen optreden zal Delft3D geen juiste snelheden weergegeven. Dit is het geval bij de boeg en het achterstevan. Ook onder het schip is de snelheid die Delft3D aangeeft niet reëel en kan verder niet gebruikt worden als indicatie voor de optredende retourstroom.

6.2 Invoer Delft3D

Het is de bedoeling om de maatgevende hydraulische belasting gedetailleerder te bepalen met Delft3D. De maatgevende belasting bestaat uit twee olopende schepen. Als eerste wordt er met één schip gerekend wanneer deze situatie gevalideerd is kan verder gerekend worden met twee schepen. Wanneer de afmetingen van dit schip zijn ingevoerd en gevalideerd voor kanaalprofielen (2) en (3), zal verder gerekend worden met twee olopende schepen.

Het eerste schip wat gemodelleerd wordt is een:

- Rijnmaxschip met afmetingen van 135x17x 4,0 meter.

De maatgevende scheepscombinatie bestaat uit twee schepen:

- Rijnmaxschip met afmetingen van 135x17x4,0 meter;
- Duwbakcombinatie met de afmetingen van 200x22,8x4,0 meter.

Het varend Rijnmaxschip kan als volgt ingevoerd worden in Delft3D.

- Geforceerd drukveld opleggen;
- Drukveld met de scheepsnelheid door het kanaal laten bewegen;
- Kanaalprofiel en lengte invoeren en aan uiteinden van het kanaal grenzen opstellen.

Om in Delft3D-Flow een schip te modelleren, wordt gebruik gemaakt van een variërend wind-drukveld, waarbij de windsnelheden op nul gezet worden en het drukveld ter plaatse van het schip de waarde krijgt van:

$$P = \rho g d_s \quad P = 1000 \times 9,81 \times 4,0 \quad (6-2)$$

P	Druk	[N/m ²]
ρ	Soortelijke dichtheid	[kg/m ³]
g	gravitatie constante	[m/s ²]
d_s	Diepgang schip	[m]

De luchtdruk die opgelegd wordt is een geforceerde luchtdruk, deze zorgt ervoor dat een schip gesimuleerd wordt. De opbouw van het windveld is geschreven in een apart scriptfile volgens Delft3D-Flow. De druk, opgelegd op een cel, is dan gelijk aan 39240 N/m^2 (Pa). Dit komt overeen met een diepgang van het schip van vier meter. Het script voor de windfile is opgenomen in bijlage 7. In deze bijlage wordt het script voor twee schepen weergegeven.

Door het drukveld met de vaarsnelheid over het grid te bewegen, wordt het schip gesimuleerd. Het grid wat gebruikt wordt heeft de afmetingen van 3,33 m in de x richting en 3,33 m in de y richting. Het kanaal is 30 gridcellen breed en 1500 gridcellen lang. Deze lengte is gekozen zodat de translatiegolf die optreedt bij de vaarbeweging van het schip en op het uiteinde van het kanaal teruggekaatst wordt, geen invloed heeft op het vaargedrag van het schip. Op de open uiteinden van het kanaal wordt een begrenzing opgelegd die hoort bij de windfile $PavBnd = 100000 \text{ N/m}^2$. $PavBnd$ staat voor de *Average Pressure on Boudaries*, deze term werkt op alle open boundaries in het model. Verder worden er aan de uiteinden van het kanaal geen randvoorwaarden opgelegd in de vorm van stroomsnelheden of waterstanden. Wel wordt er een initiële waterstand van -0.40 meter aangehouden, dit komt overeen met het kanaalpeil. Het modelgebied bestaat uit een bak met stilstaand water, deze bak heeft een breedte van 100 meter en een lengte van 5 kilometer.

In Delft3D wordt standaard gerekend met een σ -grid. Het andere grid waarmee gerekend kan worden is een z-grid. In een σ -grid zijn de stroomlijnen gekromd, in een z-grid blijven alle gridcellen rechthoekig. In het verleden zijn voor simulaties van varende schepen een z-grid gebruikt.

De eddy viscosity ν [m^2/s] is een parameter die in een normale stroming, bijvoorbeeld een rivier, met een waterdiepte van 5,00 meter en een stroomsnelheid van 1,00 m/s een waarde van $1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ heeft [CT 5312]. Met het modelleren met de waarde van $1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ wordt geen juiste uitvoer verkregen voor de retourstroom. Achter het schip blijft de retourstroom lange tijd heel hoog, dit klopt niet met de werkelijkheid. In werkelijkheid is achter het schip geen invloed meer van de retourstroom. Bij een hogere viscositeit van $1,00 \text{ m}^2/\text{s}$ komt de uitvoer beter overeen met DIPRO.

Een afschatting van de eddy viscosity kan gedaan worden door de volgende formule te gebruiken:

$$\nu \approx l_m^2 \left| \frac{du}{dy} \right| \quad (6-3)$$

ν	Eddy viscosity	[m^2/s]
l_m	Mengweglengte	[m]
K	Von Karman coefficient	[-]
y	Afstand in y-richting	[m]
u	Retourstroom	[m/s]

De mengweglengte wordt uitgedrukt in de Von Karman coëfficiënt maal de lengte waarover de turbulentie optreedt ($K \cdot y$). Het schip vaart op 17 meter uit de wal waarbij de wal en het schip als dichte wand worden aangenomen. Hierdoor wordt de dy 17 meter. De retourstroom die in deze situatie werkt wordt gesteld op 1,50 m/s (du). De Von Karman coëfficiënt is 0,4. Hiermee wordt de schatting voor de eddy viscosity:

$$v \approx (K \cdot y)^2 \left| \frac{du}{dy} \right| \quad (6-4)$$

$$v \approx (0,4 \cdot 17)^2 \left| \frac{1,50}{17} \right| = 4,0 \text{ [m}^2/\text{s]}$$

Hieruit blijkt dat de schatting voor de eddy viscosity hoger is dan de gebruikte eddy viscosity in het model. Een ander punt is dat de geschatte eddy viscosity hoog is vergeleken met de verwachte eddy viscosity van 0,01 [m²/s] [CT 5312]. In De verdere modellen wordt een eddy viscosity van 1,00 m²/s aangehouden omdat deze waarde het beste resultaat geeft bij het valideren van het model.

Voor het ontwerpen van een nieuw kanaalprofiel is van belang welke snelheid gevaren wordt in het kanaal. De maximale snelheid die gevaren mag worden is 18 km/uur. Deze snelheid is voor de grotere schepen niet haalbaar, omdat deze groter is dan de grenssnelheid. De vuistregels die vaak gehanteerd worden zijn 0,7 of 0,9 maal de limietsnelheid, afhankelijk of het schip geladen of ongeladen is. In Delft3D zal alleen verder gerekend worden met de waarden van 0,7 en 0,8. De waarde van 0,9 maal de limietsnelheid zal geen gangbare snelheid zijn voor geladen schepen en daardoor verder niet meegenomen in de berekening.

In de tabel zijn verder parameters weergegeven die gebruikt zijn in het model voor één schip.

Parameter	Waarde	Eenheid
M grid cells	1502	[-]
N grid cells	32	[-]
B _w	100	[m]
h	6~7,6	[m]
V _{lim}	variërend	[m/s]
V _s	0,7 ~0,8 V _{lim}	[m/s]
d _s	4,00	[m]
v (eddy viscosity)	1,00	[m ² /s]
Weerstandscoefficiënt	0,005	[-] Manning
Initiële waterstand	-0,40	[m]
Dichtstbijzijnde afstand tussen schip en oever bij excentrisch varen in het kanaal	17	[m]
Zmodel	toegepast	
Average Pressure on Boundaries (PavBnd) <i>Randvoorwaarde</i>	100000	[N/m ²]

Tabel 6-1: Parameters Delft3D

6.3 Valideren model

Het valideren van het model is nodig om het model overeen te laten komen met de werkelijkheid. De uitvoer van het Delft3D model kan gevalideerd worden aan de hand van de 1D uitvoer van het programma DIPRO.

Wanneer het drukveld in één tijdstap direct geforceerd wordt tot een diepte van 4,0 meter (diepgang schip) geeft dit veel oscillaties in het kanaal. Door het drukveld met elke tijdstap verder in het water te drukken tot de diepgang van het schip bereikt is, zullen deze oscillaties

verminderen. Ook vermindert het de lopende golven die ontstaan in het model, deze golven dempen nagenoeg niet uit en geven ruis in de berekeningen.

Het schip is in eerste instantie gemodelleerd als een rechthoek die door het water beweegt. De waarden die hieruit volgen zijn niet goed genoeg in vergelijking met DIPRO, ook wordt de lopende golf in het kanaal dan te groot en geeft het veel ruis in het model. Wanneer de boeg vloeiender en achtersteven vloeiender ingevoerd worden geeft dit minder ruis en een beter resultaat. Zo komen de waarden van Delft3D dichterbij de DIPRO waarden te liggen. De ronding van de boeg hangt af van de grootte van het grid, bij een grof grid zal de boeg dan ook grof blijven. Bij een fijner grid wordt de boeg vloeiender en daardoor ook realistischer

In dit model is gerekend met een z-grid, dit grid geeft een betere en stabielere uitkomst dan een σ -grid. In een σ -grid zal door de kromming van de lijnen rondom het schip geen goede uitspraak over de waterspiegel en retourstroom gedaan kunnen worden. Zo zijn de numerieke golven achter het schip in een z-grid uitgedempt en de primaire waterbeweging blijft hetzelfde. Bij een σ -grid zal achter het schip numerieke golven ontstaan die geen relatie hebben met de werkelijkheid. Bij het z-grid treden deze golven niet op en wordt er een beter beeld gegeven van de werkelijke primaire waterbeweging.

De grootte van het grid is bepalend voor de grootte van de schepen op de waterlijn. Bij verandering van het grid is het belangrijk dat de schepen ook in DIPRO worden aangepast.

Doordat de schepen met een snelheid lager dan de grenssnelheid varen zal het Froude getal in de simulatie ook niet hoger dan zijn 1. In het model in Delft3D blijkt dat het Froude getal onder de 1 blijft, de stroming is niet superkritisch.

6.3.1 Uitvoer model huidige situatie

In deze paragraaf wordt als eerste een uitvoer gegeven van de huidige situatie. Deze situatie is opgenomen om het model te valideren en tegelijkertijd een beeld te krijgen van de stroming in de huidige situatie.

Voor de volgende situaties die gemodelleerd zijn is de uitvoer weergegeven:

- Maatgevend schip vaart in de as van het kanaal;
- Maatgevend schip vaart uit de as van het kanaal;

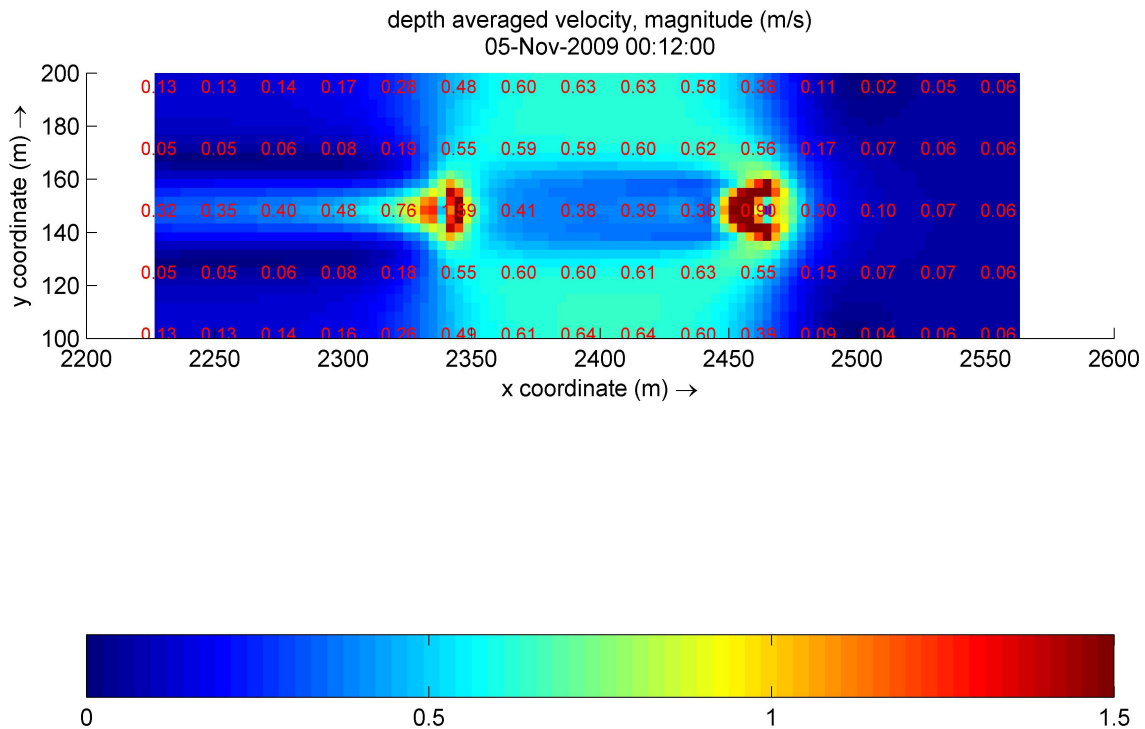
Beide simulaties worden vergeleken met de uitvoer van DIPRO.

Rijnmaxschip vaart in het midden van het kanaal.

De uitvoer van Delft3D geeft een dieptegemiddelde snelheid voor de retourstroom en een uitvoer van de waterstanden. In bijlage 5 zijn grafieken en figuren te zien van de uitvoer van Delft3D. Hieronder zijn de figuren te zien die representatief zijn voor het maatgevende schip.

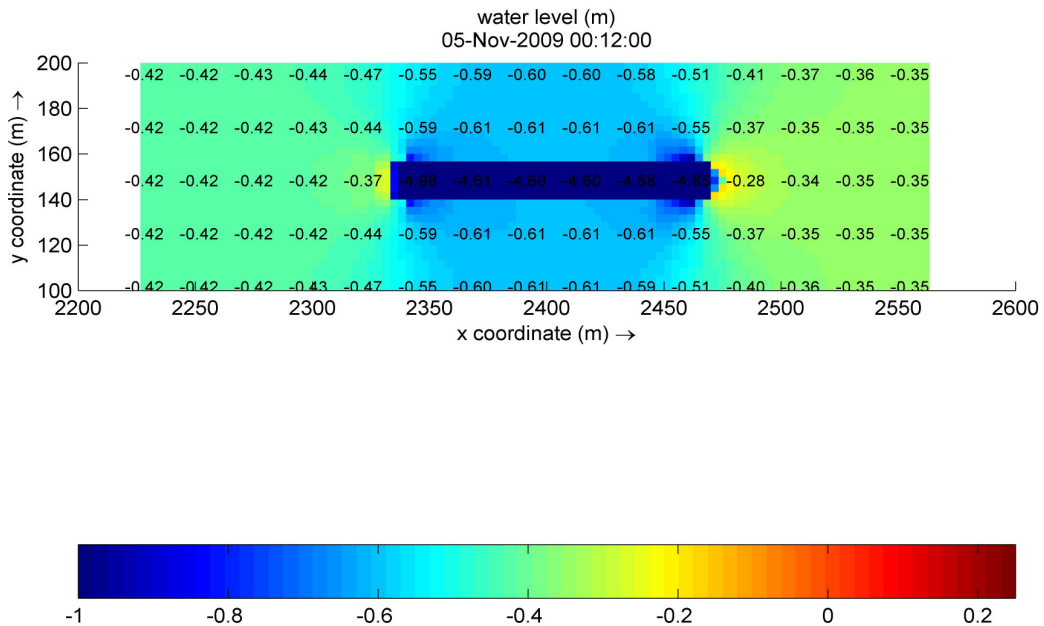
De uitgangspunten voor deze simulatie zijn:

- Schip vaart in as van het kanaal;
- Vaart met snelheid $0,7 V_{lim}$, $V_s=3,24$ [m/s];
- Afmetingen Rijnmaxschip $135,00 \times 17,00 \times 4,00$ [m];
- Huidig gebroken bakprofiel zie figuur 2-3.



Figuur 6-1: Diepte gemiddelde snelheid, rondom Rijnmaxschip (uitvoer Delft3D)

In figuur 6-2 is de diepte gemiddelde snelheid te zien. Doordat het schip in het midden van het kanaal vaart zijn de snelheden aan beide zijden gelijk. Onder het schip geeft Delft3D de snelheden niet goed weer. Waardoor de uitvoer van dit gedeelte niet juist is.



Figuur 6-2 : Waterspiegelvariatie rondom Rijnmaxschip, referentie peil -0,40 (uitvoer Delft3D)

In figuur 6-3 zijn de waterstanden weergegeven rondom het schip. Bij de uitvoer en figuren moet erop gelet worden dat de waterspiegel voor en achter het schip gelijk is met het kanaalpeil in het Amsterdam-Rijnkanaal (-0,40 meter). Door de lopende golf in het model is de waterstand voor het schip iets hoger. De waterstand voor het schip wordt daardoor -0,35. Door het verschil tussen -0,35 en de waarde naast het schip zal de waterstandverlaging uitkomen op 0,26 meter. Het waterpeil is aan beide zijden van het schip ook gelijk. Dit klopt volgens de theorie die hoort bij de continuïteitsvergelijking en Bernoulli, waterspiegeldaling geeft een hogere snelheid. De snelheid en waterstandsverlaging blijven over de gehele lengte van het schip ongeveer gelijk.

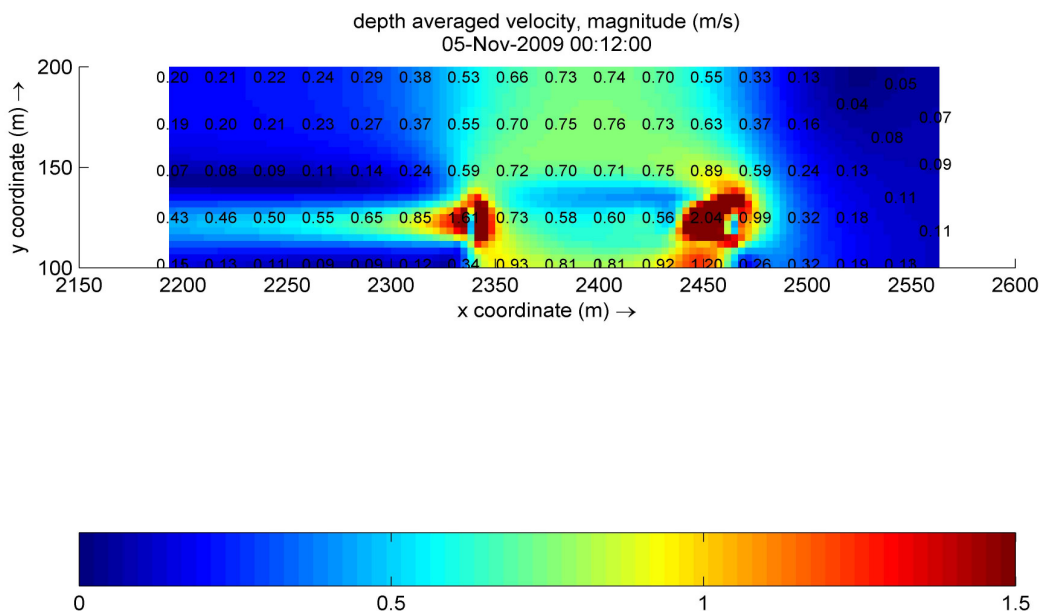
Rijnmaxschip vaart uit as van het kanaal

In DIPRO wordt de limietsnelheid kleiner, als het schip uit het midden van het kanaal vaart. Hiermee dient rekening gehouden te worden bij het vergelijken van beide uitvoeren. In deze situatie wordt de snelheid gebruikt die de schepen varen in het midden van het kanaal.

Grotere schepen varen zoveel mogelijk in het midden van het kanaal. Wanneer een schip dicht langs de kant vaart, zal dit zijn om ruimte te maken voor andere schepen. Omdat dit maar van korte duur is, wordt de snelheid aangehouden die het schip vaart in het midden van het kanaal. Dit geeft een betere vergelijking met Delft3D. In DIPRO dient de snelheid van $0,7V_{lim}$ veranderd te worden in $0,76V_{lim}$ om de snelheid van 3,24 m/s te behouden, zodat de snelheid in DIPRO weer overeenkomt met Delft3D.

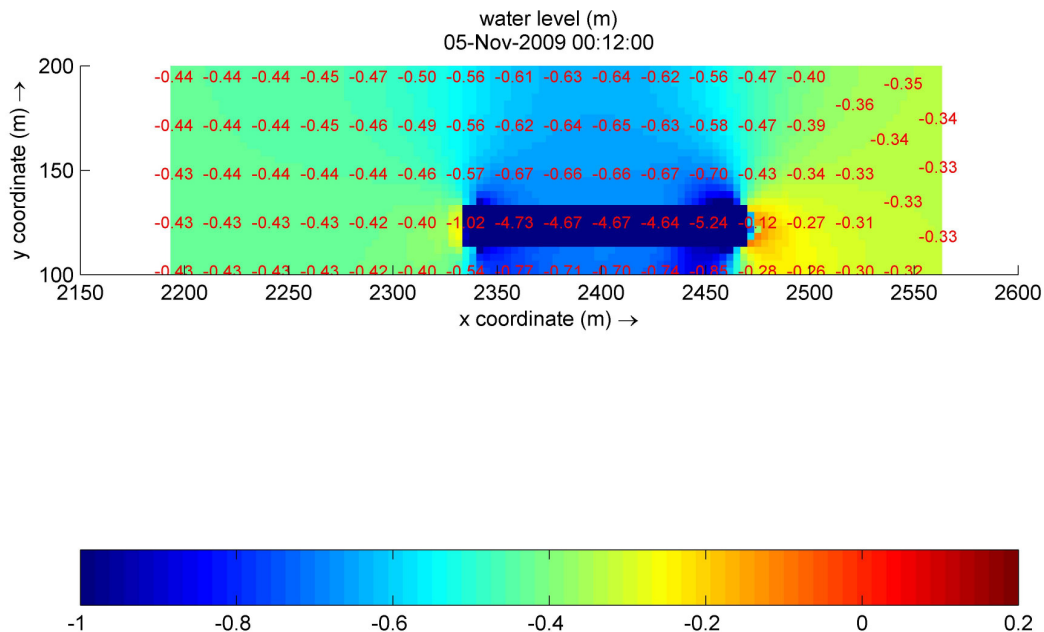
De uitgangspunten voor deze simulatie zijn:

- Schip vaart uit as van het kanaal;
- Vaart met snelheid $0,76 V_{lim}$, $V_s=3,24$ [m/s];
- Afmetingen Rijnmaxschip $135,00 \times 17,00 \times 4,00$ [m];
- Huidig gebroken bakprofiel zie figuur 2-3.



Figuur 6-3: Diepte gemiddelde snelheid bij Rijnmaxschip (uitvoer Delft3D)

In figuur 6-4 is duidelijk te zien dat wanneer een schip dicht langs de kant vaart dat de retourstroom langs de kant hoger is. De maximale retourstroom bij de oever komt op 1,20 m/s. Doordat het schip uit het midden vaart is bij de dichtstbijzijnde oever de stroomsnelheid het grootst.



Figuur 6-4: Waterspiegel variatie rondom Rijnmaxschip (uitvoer Delft3D)

In figuur 6-5 is de waterspiegeldaling tussen wal en schip weer redelijk constant. Bij een constante uitvoer over de lengte van het schip zullen de uitkomsten betrouwbaarder zijn, omdat dit in werkelijkheid ook voorkomt.

Vergelijken waarden Delft3D met DIPRO

In tabel 6-2 wordt Delft3D vergeleken met DIPRO. De schepen dienen even hard te varen met een snelheid van 3,24 m/s.

Als het schip 17 meter uit de oever vaart wordt alleen de hoogste waarde gegeven. Verder is in de figuren 6-4 en 6-5 te zien dat de hoogste snelheden rondom de boeg en achterstevan optreden en dat deze snelheden afnemen onder het schip, deze snelheden kunnen niet gevalideerd worden vanwege het ontbreken van meetgegevens. Daardoor kunnen deze snelheden onnauwkeurig zijn.

$V_s=0,7V_{lim}=3,24[m/s]$	Delft3D	DIPRO	Delft3D	DIPRO
Positie schip	Schip in as van het kanaal		Schip 17 m uit de oever	
Waterspiegeldaling [m]	0,26	0,26	0,44	0,46
Retourstroom [m]	0,60	0,60	0,82	0,80

Tabel 6-2: Uitvoer Rijnmaxschip huidige kanaalprofiel

Opmerkelijk is dat de retourstroom bij het uit de as varen hoger is dan bij het in de as varen. Dit kan te maken hebben met de V_{lim} . De V_{lim} wordt lager (in DIPRO) bij het uit de as varen. In Delft3D is de snelheid van het schip dat uit de as vaart gelijk gehouden, waardoor er een hogere belasting ontstaat. Omdat schepen bijvoorbeeld naar de kant toegaan, zal de scheepsnelheid niet in één keer direct afnemen, waardoor schepen harder blijven varen dan $0,7 V_{lim}$.

Conclusie

Delft3D komt goed overeen met DIPRO als het schip in het midden van het kanaal vaart. Voor zowel de waterspiegeldaling als de retourstroom komen de waarden overeen. Wanneer het

schip uit de as van het kanaal vaart liggen de waarden ook nog dicht bij elkaar. Wanneer dit goed overeenkomt met DIPRO kan verder gerekend worden met de nieuwe kanaalprofielen.

6.4 Uitvoer model nieuw kanaalprofiel met één schip

Voor het nieuwe kanaalprofiel is weer verder gerekend met de waarden voor geladen schepen. In deze paragraaf zullen alleen de waarden voor de retourstroom en waterspiegeldaling weergegeven worden zonder de figuren. Wel zullen de figuren van maatgevende scheepscombinatie worden weergegeven in deze paragraaf.

6.4.1 Kanaalprofiel (2)

De volgende situaties zijn gemodelleerd in een bakprofiel met een nat oppervlak van 600 m², een waterdiepte van 6 meter en een breedte op de waterlijn van 100 meter.

- Rijnmax in de as van het kanaal;
- Rijnmax 17 meter uit de oever.

De snelheid in de as van het kanaal is $0,7 V_{lim}$, dit komt neer op een vaarsnelheid van 3,33 m/s. Deze vaarsnelheid is ook aangehouden wanneer het schip 17 meter uit de oever vaart. De onderstaande tabel 6-3 laat zien welke stroomsnelheden en waterspiegeldaling optreden.

$V_s=0,7V_{lim}=3,33$ [m/s]	Delft3D	DIPRO	Delft3D	DIPRO
Positie schip	Schip in as van het kanaal		Schip 17 m uit de oever	
Waterspiegeldaling [m]	0,28	0,25	0,41	0,45
Retourstroom [m]	0,56	0,55	0,71	0,74

Tabel 6-3: Uitvoer Rijnmaxschip kanaalprofiel (2)

Wanneer het Rijnmaxschip uit de as van het kanaal vaart, is de waterspiegeldaling minder goed te modelleren dan de retourstroming. DIPRO geeft bij het uit de as van het kanaal varen een lagere V_{lim} aan, door de parameter van $0,7 V_{lim}$ te vergroten wordt dezelfde vaarsnelheid aangehouden. De retourstroom komt goed overeen met de waarden van DIPRO. Het is belangrijk dat de retourstroom klopt omdat die maatgevend is voor een verdere berekening van de erosie. In de waterstand zit een lichte afwijking, dit is voor het vervolg van deze studie niet belangrijk.

6.4.2 Kanaalprofiel (3)

De volgende situaties zijn gemodelleerd in een gebroken bakprofiel met een nat oppervlak van 751 m², een waterdiepte van 7,60 meter en een breedte op de waterlijn van 100 meter.

- Rijnmax in as van het kanaal;
- Rijnmax 17 meter uit de oever.

Het Rijnmaxschip vaart met een snelheid van $0,7 V_{lim}$ dit geeft een snelheid van 4,00 m/s. Wanneer het schip uit de as vaart zal de snelheid afnemen, hierdoor dient in DIPRO de snelheid aangepast te worden, om zo dezelfde snelheid met Delft3D te houden en het geheel goed te kunnen vergelijken.

$V_s=V_{lim}=4,00$ [m/s]	Delft3D	DIPRO	Delft3D	DIPRO
Positie schip	Schip in as van het kanaal		Schip 17 m uit de oever	
Waterspiegeldaling [m]	0,26	0,252	0,43	0,55
Retourstroom [m]	0,51	0,515	0,74	0,74

Tabel 6-4: Stroomsnelheden en waterspiegeldaling kanaalprofiel (3)

Conclusie

Kanaalprofiel (3) heeft een groter nat oppervlak en een grotere waterdiepte dan kanaalprofiel (2). Bij een groter nat oppervlak wordt de vaarsnelheid groter. Door de hogere vaarsnelheid en het groter nat oppervlak, ontstaat een situatie die het vergelijken van de retourstroom tussen kanaalprofiel (2) en (3) bemoeilijkt.

Verder kan geconcludeerd worden dat de stroomsnelheden veroorzaakt door de schepen goed overeenkomt met DIPRO. Hierdoor is het model bruikbaar om twee schepen in te laten varen. Wel dient opgemerkt te worden dat de nauwkeurigheid van het model niet verder gevalideerd kan worden. De stroming onder het schip en bij de boeg en achterstevan kan niet nauwkeurig gemodelleerd worden vanwege het ontbreken van gegevens om te valideren.

6.5 Uitvoer voor twee schepen

In het nieuwe kanaalprofiel zal ook onderzocht worden welke retourstroming en waterspiegeldaling er optreedt bij de het oplopen van twee schepen. Hierbij zal de windfile aangepast moeten worden, zodanig dat twee drukvelden tegelijkertijd zich in het kanaalprofiel bevinden.

Met het modelleren van twee schepen dient met enkele punten rekening gehouden te worden:

- Schepen veranderen niet van baan door zijdelingse krachten die in werkelijkheid wel op het schip werken;
- Schepen varen alleen in een rechte baan langs elkaar;
- Het drukveld wordt telkens één of meerdere gridcellen doorgeschoven. Door de gridcellen te verkleinen en drukveld 1 (schip 1) bv. één gridcel door te schuiven en drukveld 2 (schip 2) meerdere drukvelden door te schuiven in dezelfde tijdstep, ontstaat er een mogelijkheid om schip 2 tweemaal zo hard te laten varen als schip 1;
- Schip 1 vaart dicht langs de kant (17m), schip 2 komt op een scheepsbreedte (17m) langs om te passeren;
- De twee schepen die gemodelleerd worden zijn: een Rijnmaxschip ($b_s=17m$) wat een vierbaksduwstel ($b_s=22m$) oploopt.

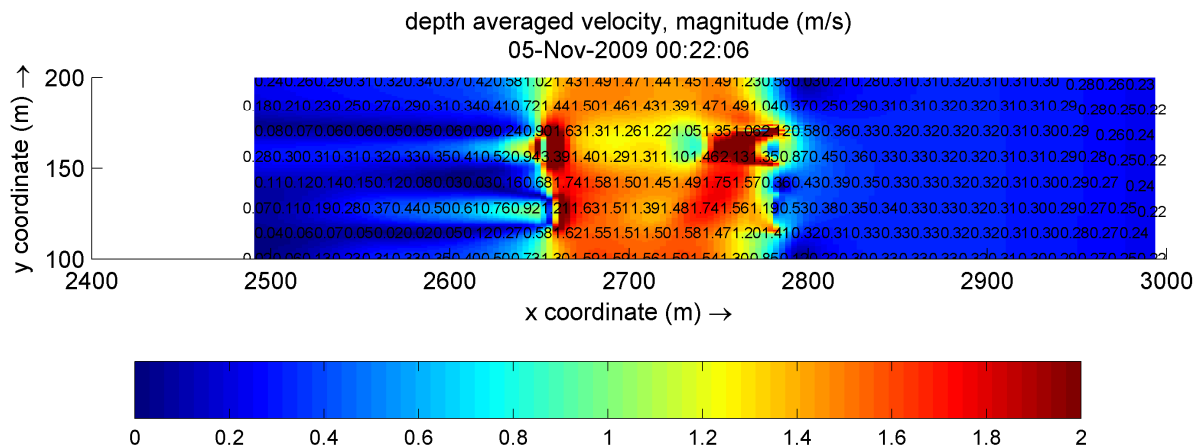
Aanpassing invoer

Wanneer hetzelfde grid gebruikt wordt als in de voorgaande paragrafen ontstaat er een situatie die niet wenselijk is. Het grid uit de voorgaande runs is een grof grid. Hierdoor krijgt de waterstand tussen de schepen een waarde die veel te laag en bovendien onrealistisch is. Door het grid aan te passen en fijner te maken wordt een betrouwbaardere situatie bepaald voor de retourstroom.

In de volgende simulatie is gekozen om het grid alleen in dwarsrichting te verkleinen. Door het grid in de dwarsrichting te verkleinen van 3,33 m naar een breedte van één meter ontstaat er een grid met de afmetingen van $M=1500$ en $N=100$ gridcellen. Eerder waren in de N-richting 30 gridcellen aanwezig. Hierdoor is het aantal cellen tussen de schepen toegenomen waardoor de uitkomsten beter zijn.

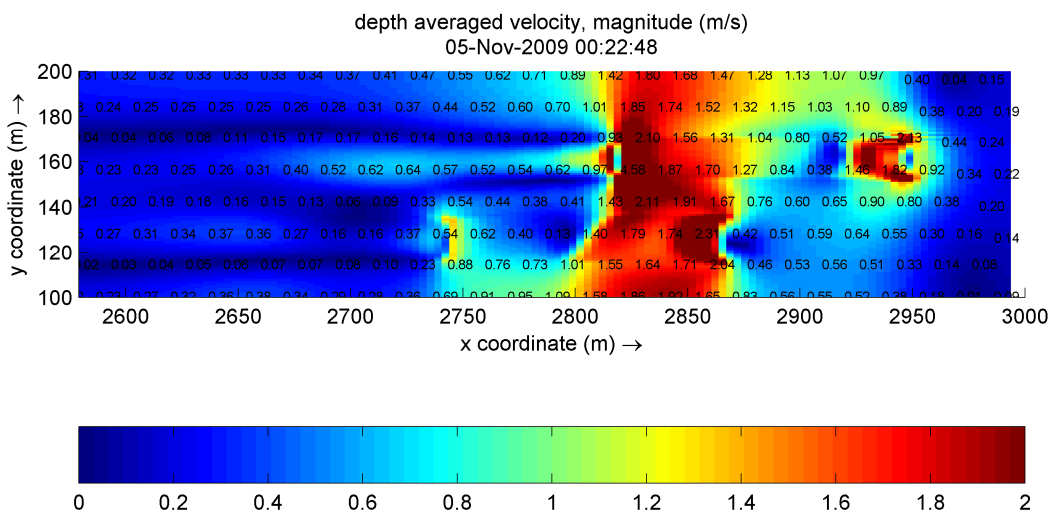
6.5.1 Situatie in kanaalprofiel 2

In deze situatie varen de schepen respectievelijk 3,98 m/s en 1,99 m/s.



Figuur 6-5: Kanaalprofiel (2) met twee schepen (uitvoer Delft3D)

In figuur 6-6 is te zien dat twee schepen elkaar oplopen, in deze situatie is duidelijk te zien dat de retourstroom tussen de schepen hoog is. Het oplopende schip vaart verder van de kant dan het andere schip. Duidelijk is dan te zien dat het rodere gedeelte tussen het langzame schip en de oever een hogere retourstroom genereert dan aan de andere zijde. De retourstroom dicht aan de kant is in de orde van 1,55 m/s.



Figuur 6-6: Kanaalprofiel (2) met twee schepen (uitvoer Delft3D)

De maximale retourstroom die optreedt, is figuur 6-7 te zien. Hierin is te zien dat wanneer het oplopende schip bijna geheel voorbij het langzamere schip is de retourstroom extreem hoog wordt. Hierbij gaan de maximale piekwaarden aan de oever richting de 2,00 m/s. Gemiddeld komen de waarden ongeveer op 1,85 m/s uit.

Locatie schepen in het kanaal	Maximale retourstroom
Figuur 6-6 Schepen naast elkaar	1,55 m/s
Figuur 6-7 Schepen bijna elkaar voorbij	1,98 m/s

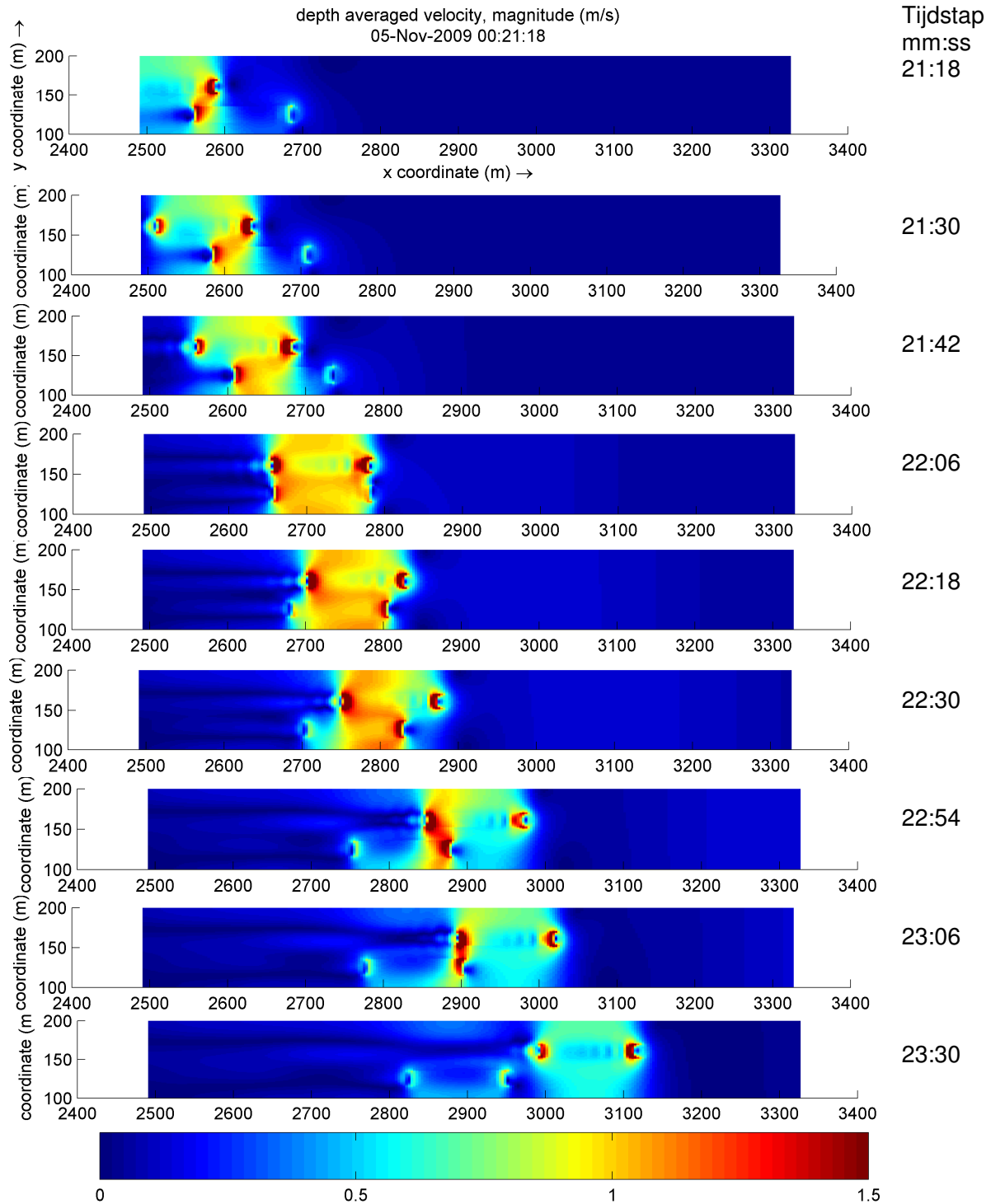
Tabel 6-5: Waarden maximale retourstroom kanaalprofiel (2)

In hoofdstuk 5 is verondersteld dat de maximale retourstroom op het moment is dat de schepen naast elkaar zijn. Uit de uitvoer van Delft3D blijkt dat de maximale retourstroom optreedt als de schepen elkaar bijna gepasseerd zijn.

Verder kan geen goede vergelijking meer gemaakt worden met DIPRO omdat bij DIPRO de twee schepen als één nat oppervlak ingevoerd worden, hierdoor ontstaat een situatie die niet meer te vergelijken is met Delft3D, dit zal dan verder ook niet meer gedaan worden.

6.5.2 Kanaalprofiel (3)

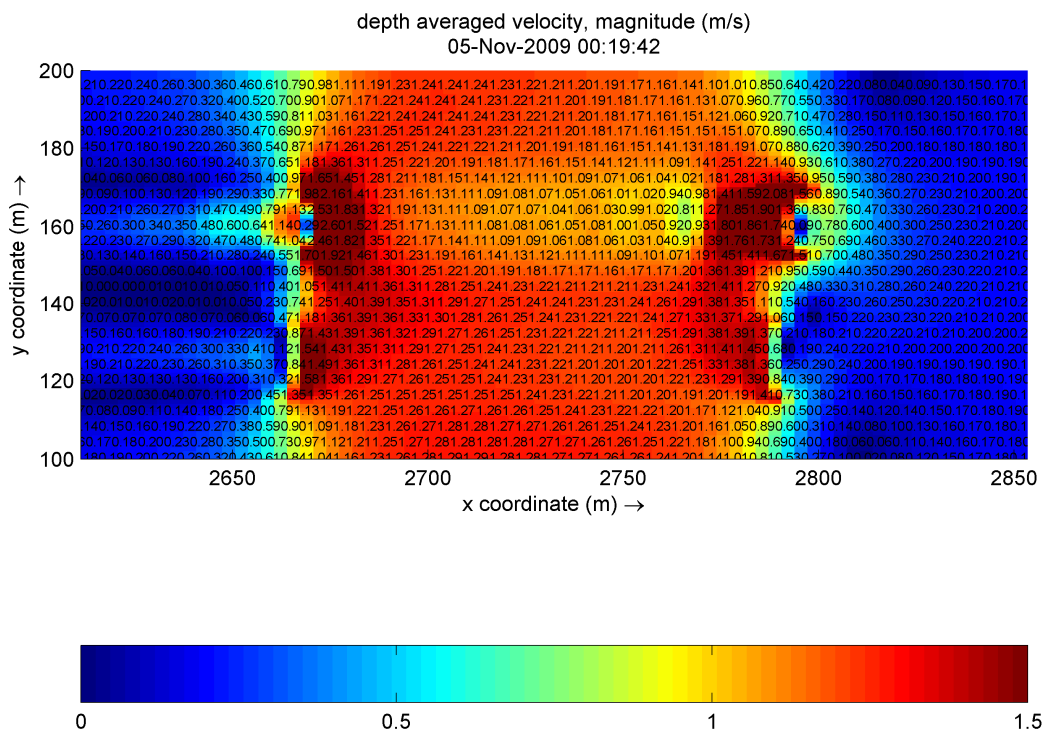
Dit kanaalprofiel heeft een breedte van 100 meter en een gebroken bakprofiel de waterdiepte is 7,6 meter. Als eerste is gerekend met dezelfde vaarsnelheid als in kanaalprofiel (2), (4,00 m/s en 2,00 m/s) dit levert de figuren op in figuur 6-8.



Figuur 6-7: Model uitvoer(D3D) van twee oplopende schepen in kanaalprofiel (3), $V_s=0,7V_{lim}$

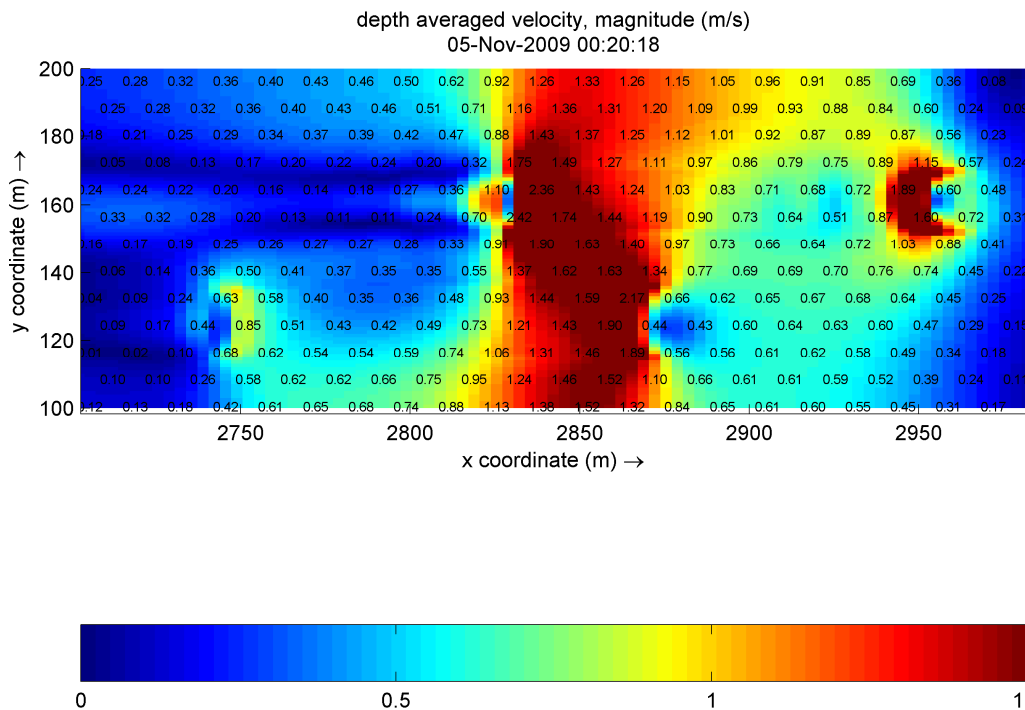
De verschillende figuren geven duidelijk weer wat gebeurd tijdens het oplopen. Vanaf tijdstap 22:06 tot tijdstap 22:54 treden de hoogste retourstromen op in deze situatie, de retourstromen komen zo ruim boven de 1 m/s uit. In de volgende simulatie is de vaarsnelheid van 0,8 V_{lim} genomen voor het snelste schip het andere schip vaart 2x zo langzaam. In deze simulatie is de factor van de grenssnelheid gelijk gehouden met die in de simulatie voor kanaalprofiel (2). In figuur 6-9 is duidelijk te zien wat de vergroting is van de retourstroom bij twee oplopende schepen.

Door vergroting van de vaarsnelheid naar 0,8 V_{lim} is er een duidelijk verschil te zien tussen de toename van het rode gebied daar is de retourstroom dus groter. Van deze simulatie zijn figuren 6-9 en 6-10. In figuur 6-9 zijn de schepen precies naast elkaar. De optredende retourstroom is dicht bij de wal in de orde van 1,3 m/s.



Figuur 6-8: Kanaalprofiel (3) met twee schepen, $V_s=4,5$ m/s en $V_s=2,25$ m/s (uitvoer Delft3D)

Figuur 6-10 laat weer de maximale retourstroom zien die optreedt in deze simulatie. De maximale retourstroom is ongeveer 1,52 m/s. Opmerkelijk is dat door de hoge vaarsnelheid van het oplopende schip, Delft3D ook onder het langzame schip een hoge retourstroom geeft. Verder is te zien dat tussen de twee schepen de retourstroom iets hoger is dan aan de bovenzijde. Tussen het onderste schip en de wal is de retourstroom ongeveer even groot als tussen de twee schepen. Dit kan komen doordat de afstand tussen de schepen onderling 17 meter is en tussen het langzame schip en de wal ook 17 meter.



Figuur 6-9: Kanaalprofiel (3), twee schepen $V_s=4,50$ m/s en $V_s=2,25$ m/s (uitvoer Delft3D)

In figuur 6-10 wordt de maximaal optredende retourstroom weergegeven die optreedt wanneer de schepen elkaar al voor een groot gedeelte hebben gepasseerd. Opmerkelijk is dat de retourstroom doorloopt tot aan de oeverconstructie.

Tabel 6-6 geeft de waarden aan voor de maximale retourstroom, deze waarden kunnen verder gebruikt worden voor het bepalen van de erosie.

Locatie schepen in het kanaal	Retourstroom
Figuur 6-9 Schepen naast elkaar	1,28 m/s
Figuur 6-10 Schepen bijna elkaar voorbij	1,52 m/s

Tabel 6-6: Waarden maximale retourstroom kanaalprofiel (3)

Vergelijking kanaalprofiel (2) en (3)

In de tabel 6-7 worden de retourstromen vergeleken van de kanaalprofielen (2) en (3). Hierdoor is te zien dat de retourstroom in kanaalprofiel (2) hoger is dan in kanaalprofiel (3). De maximaal optredende retourstroom is in de tabel een dieptegemiddelde snelheid.

Kanaalprofiel	Maximaal optredende retourstroom [m/s]	Retourstroom in situatie twee schepen precies naast elkaar [m/s]	Snelheid [m/s]
(2)	1,98	1,55	$0,82V_{lim} = 4,00$ m/s en 2,00 m/s
(3)	1,52	1,28	$0,80 V_{lim} = 4,50$ m/s en 2,25 m/s

Tabel 6-7: Maximale retourstroom kanaalprofiel (2) en (3)

Bruikbaarheid model

Het model met twee schepen is bruikbaar om de retourstroom gedetailleerder te bepalen. Deze gedetailleerdere retourstroom kan verder niet gevalideerd worden waardoor de uitvoer wel gedetailleerder is maar niet nauwkeuriger hoeft te zijn. Verder wordt onder het schip wordt de retourstroming niet goed weergegeven. Ook is alle stroming die achter het schip optreedt niet reëel deze stroming treedt in werkelijkheid niet op (door de retourstroom). Wel door de schroefstraal maar die is in Delft3D niet meegenomen in het model.

Door de gedetailleerde weergave is de maximale retourstroom bepaald waarmee verder de optredende erosie berekend kan worden.

6.6 Voorspelling optredende erosie

In deze paragraaf wordt onderzocht wat de mogelijke erosie is bij het nieuwe kanaalprofiel. Er wordt onderzocht wat de retourstroom doet met het bodemmateriaal. Hierbij worden de volgende uitgangspunten meegenomen:

- Maximaal optredende retourstroom uit vorige paragraaf;
- Kanaalprofiel (2) en (3);
- Waterdiepte 6 meter / 7,6 meter;
- Schip vaart op 17 meter uit de kant;
- Het kanaal heeft een vlakke bodem;
- Bodemmateriaal bestaat uit fijn zand $D_{50} = 150 \mu\text{m}$.

De maximaal optredende retourstroom is te gebruiken voor de bepaling van de optredende erosie. In [M1115 XIX,1988] staat beschreven onder welke omstandigheden de mate van erosie bepaald kan worden aan de hand van de extreme retourstroom. De bepaling van de erosie is volgens [M1115 XIX, 1988] gebaseerd op formules uit de rivierwaterbouw en zijn niet specifiek ontworpen voor de scheepvaart. Wel zijn ze aangepast om zo een mogelijke schatting te kunnen geven van de optredende erosie.

Met het criterium van Shields kan de stroomparameter bepaald worden. In deze formule is $\hat{\tau}$ de maximale schuifspanningsparameter, en in dit geval is de D_{50} de bekende waarde van $150 \mu\text{m}$.

$$\Psi = \frac{\hat{\tau}}{\rho g \Delta D_{50}} \cdot \frac{1}{k} \quad (6-5)$$

Ψ	Stroomparameter	[-]
$\hat{\tau}$	Maximale schuifspanning	[N/m ²]
ρ	Dichtheid water	[kg/m ³]
ρ_s	Dichtheid bodemmateriaal	[kg/m ³]
Δ	Relatieve dichtheid $\Delta = \frac{\rho - \rho_s}{\rho}$	[-]
D_{50}	Karakteristieke steendiameter	[m]
k	Taludfactor	[-]

Waarin

$$\hat{\tau} = \frac{1}{2} c_r \cdot \rho \cdot \hat{u}_r^2 \quad (6-6)$$

De schuifspanningscoëfficiënt c_{fr} kan op de volgende manier bepaald worden:

$$c_{fr} = \left(2,87 + 1,58 \log \left(\frac{x}{k_s} \right) \right)^{-2,5} \quad (6-7)$$

Voor c_{fr} zijn de volgende parameters verder gedefinieerd:

$$x = \frac{\hat{u}_r}{V_s + \hat{u}_r} X \quad (6-8)$$

c_{fr}	Schuifspanningscoëfficiënt ten gevolge van retourstroom	[m]
x	Karakteristieke afstand	[m]
X	Factor (0,10 á 0,20) L_s	[-]
\hat{u}_r	Maximale retourstroom	[m/s]
$V_{s,rel}$	Verskil in vaarsnelheid schepen	[m/s]
k_s	Bodemruwheid	[m]

De waarde van x geeft de karakteristieke afstand weer waarover de maximale retourstroom werkt. De waarde voor k_s kan voor een vlakke bodem op $3,5D_{50}$ gesteld worden, dit geeft een acceptabele gemiddelde waarde voor de bodemruwheid.

Wanneer het criterium van Shields bekend is kan verder gerekend worden met de transportvergelijking. In rapport [1115 XIX, 1988] worden twee verschillende transportvergelijkingen gegeven die gebruikt worden voor deze situatie. De Paintal vergelijking en de Meyer-Peter en Muller vergelijking.

De Paintal formule geldt voor situaties dat de stroomparameter $\Psi < 0,1$. Bij grotere waarden mag Meyer-Peter en Muller gebruikt worden [1115 XIX, 1988]. Uit metingen in het verleden is gebleken dat deze redelijk overeenkomt met de verplaatsing van de erosie.

In het geval van de scheepscombinatie waarmee in de vorige paragraaf gerekend is wordt de de stroomparameter $\gg 0,1$ bij deze stroomparameter dient verder gerekend te worden met Meyer-Peter en Muller vergelijking.

De transportvergelijking voor Meyer-Peter en Muller ziet er als volgt uit:

$$\phi = 13,3 (\mu \psi - 0,047)^{3/2} \quad (6-9)$$

ϕ	Transportparameter	[-]
μ	Ribbelfactor gesteld op 1,00	[-]
ψ	Stroom- of schuifspanningsmeter	[-]

Wanneer de transportparameter bekend is kan de transportintensiteit q_s bepaald worden. Dit volgt dan uit:

$$q_s = \phi (g \Delta D_{50}^3)^{0,5} \quad (6-10)$$

Het materiaaltransport per scheepspassage wordt gegeven door Q_s per m^1 breedte van het kanaalprofiel:

$$Q_s = q_s \cdot \Delta t \quad (6-11)$$

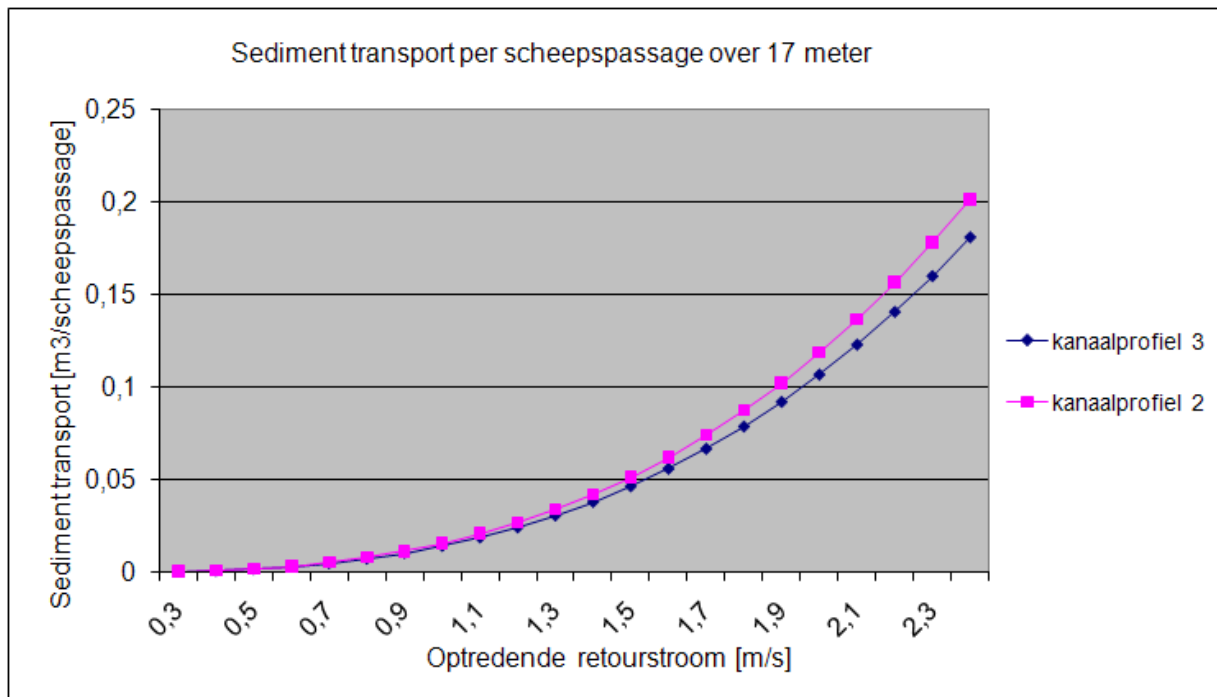
$$\text{Waarin } \Delta t = 0,2 \cdot \frac{L_s}{V_s}$$

q_s	Transportintensiteit	$[m^3/m/s]$
Q_s	Materiaaltransport per scheepspassage	$[m^3/m]$
Δt	Tijdsinterval	$[s]$
L_s	Scheepslengte	$[m]$
V_s	Scheepssnelheid	$[m/s]$

De lengte van het oplopende schip is hier 135 meter. De lengte van dit schip is bepalend de optredende retourstroom.

De maximale retourstroom treedt op tussen het schip en de oever en tussen de schepen onderling. Voor het bepalen van de erosie bij de damwand oever wordt de afstand genomen tussen schip en oever deze afstand is 17 meter. Wanneer de Q_s bepaald is wordt het totale transport over de breedte waar de maximale retourstroom werkt (17 meter) bepaald. Dit is in figuur 6-11 weergegeven.

Bij nader onderzoek naar de formules die gebruikt zijn voor het bepalen van het sedimenttransport komt naar voren dat de optredende erosie niet direct afhangt van de waterdiepte. Indirect speelt de waterdiepte wel mee in de berekening. Zo is de bepaalde retourstroom afhankelijk van het nat oppervlak, en ook de vaarsnelheid van het schip is gerelateerd aan het kanaaloppervlak. De ingevoerde dieptegemiddelde maximale retourstroom en de vaarsnelheid zijn daardoor de enige parameters die een relatie hebben met de afmetingen van het kanaal. Bij de kanaalprofielen (2) en (3) is met de dieptegemiddelde maximale retourstroom de mate van erosie bepaald.



Figuur 6-10: Grafiek optredende retourstroom max. profiel (3)=1,56 m/s en profiel (2)=1,98 m/s

In de grafiek in figuur 6-11 is te zien dat de uitkomsten voor de erosie redelijk dicht bij elkaar liggen. De verschillende invoer voor de twee kanaalprofielen wordt hieronder weergegeven. Om de Δt de scheepslengte van belang en vaarsnelheid. De vaarsnelheid die ingevoerd dient te worden is het snelheidsverschil tussen de twee schepen. Dit geeft de tijd weer die de schepen erover doen om elkaar te passeren, en in tijd is er een bepaalde hoeveelheid sedimenttransport.

Invoer kanaalprofiel (2)

- Vaarsnelheid schip (1) 4,0 m/s
- Vaarsnelheid schip (2) 2,0 m/s
- Maximale retourstroom uit Delft3D 1,98 m/s

Invoer kanaalprofiel (3)

- Vaarsnelheid schip (1) 4,54 m/s
- Vaarsnelheid schip (2) 2,27 m/s
- Maximale retourstroom uit Delft3D 1,56 m/s

Uit de grafiek blijkt dat de optredende erosie lager ligt in kanaalprofiel (3) dan in kanaalprofiel (2). Dit is te verwachten om dat het nat oppervlak groter is in kanaalprofiel (3). Hierdoor neemt de vaarsnelheid toe en de maximale retourstroom af. Door de afname van de retourstroom neemt het sedimenttransport ook af.

Kanaalprofiel	Maximale retourstroom [m/s]	Optredende erosie [m ³]
(2) $V_s=4,00$ m/s	1,98	0,12
(3) $V_s=4,54$ m/s	1,56	0,052

Tabel 6-8: Optredende erosie per kanaalprofiel

De optredende erosie werkt over een breedte van 17 meter en ontstaat bij één passage van de scheepscombinatie. In de tabel 6-8 is te zien dat in kanaalprofiel (2) tweemaal zoveel erosie optreedt als in kanaalprofiel (3). Volgens [M1115 XIX, 1988] is een h/d_s verhouding van 2 een kanaalprofiel waar de erosie verwaarloosd kan worden. Kanaalprofiel (3) heeft een h/d_s verhouding van 1,9 en zal daardoor een minaal optredend sedimenttransport hebben.

Op het Amsterdam-Rijnkanaal zijn 100.000 passages per jaar. Stel dat de maatgevende situatie maar 1% voorkomt per jaar op deze plaats, dan zorgt dit voor een transport per m^1 kanaal van 1.000 passages maal de optredende erosie dit is $120 m^3$ sedimentverplaatsing over 17 meter in kanaalprofiel (2). In kanaalprofiel (3) is het sedimenttransport gehalveerd. De 1% is een aanname omdat dit getal verder niet bekend is voor het Amsterdam-Rijnkanaal, verder onderzoek naar oplopende schepen dient uit te wijzen of dit getal klopt.

Onderhoudswerk zal gedaan worden in het Amsterdam-Rijnkanaal een grove schatting wat het prijsverschil is tussen kanaalprofiel (2) en (3) zal hieronder gedaan worden. Voor kanaalprofiel (3) kan een gemiddelde retourstroom over de gehele breedte genomen worden van 1,44 m/s voor kanaalprofiel (2) kan een gemiddelde retourstroomsnelheid genomen worden van 1,89 m/s. Dit geeft een verschil in erosie van:

	kanaalprofiel (2)	kanaalprofiel (3)
retourstroom	1,44 [m/s]	1,89 [m/s]
erosie over hele breedte	0,59 [m^3 /breedte]	0,19 [m^3 /breedte]
Verskil t.o.v. (3)	0,4 [m^3 /breedte]	
1.000 passages	400 [m^3 /breedte]	
Prijs per jaar per strekkende meter	€4800,-	

Tabel 6-9: Erosie in relatie met onderhoud

In tabel 6-9 is te zien dat het verplaatste m^3 per strekkende meter in kanaalprofiel (2) $400 m^3$ hoger zijn per jaar dan in kanaalprofiel (3).

De kosten per jaar per strekkende meter kanaal zijn dan $400 m^3$ maal de baggerkosten van €12 m^3 (deze prijs zijn directe kosten zonder storkosten). De onderhoudsprijs per jaar die bij kanaalprofiel (2) erbij komt is $400 m^3 \times 12 \text{ €/}m^3 = \text{€}4800$ per strekkende meter. Deze ruwe schatting geeft een globaal beeld aan van de meerprijs voor het baggerwerk in kanaalprofiel (2). Het aantal situaties dat voorkomt is een aanname, dit zal per kanaalgedeelte onderzocht dienen te worden. Wel is duidelijk dat het onderhoudsbaggerwerk een aanzienlijke kostenpost is die in vervolgstudies meegenomen dient te worden.

Conclusie

De wens van Rijkswaterstaat voor een kanaalprofiel is een minimaal nat oppervlak van $600 m^2$ en een stabiele oeverconstructie. Om deze stabiliteit van de oeverconstructie te garanderen is het van belang dat de erosie minimaal is. Dit is het geval in kanaalprofiel (3). Dit profiel zal verder in hoofdstuk 7 getoetst worden aan de gestelde eisen uit hoofdstuk 2.

De formules die gebruikt zijn om de erosie te bepalen zijn in principe voor rivieren met een stationaire stroming ontwikkeld. Bij gebruik van de randvoorwaarden die gesteld zijn, zijn deze transportvergelijkingen ook te gebruiken voor scheepvaart. Wel dient hierbij opgemerkt te worden dat dit overeenkomt met één schip en dat met twee schepen hiervoor verder geen gegevens bekend zijn.

6.7 Verdere ontwikkeling van het model

Ook het aantal schepen dat zich in één dwarsprofiel bevindt zal verder onderzocht kunnen worden. Hierbij moet gedacht worden aan bijvoorbeeld vier kleinere schepen die in het kanaal varen. Dit betreft dan schepen in CEMT-klasse IVa en Va.

Ook de mogelijkheid om een schroefstraal in combinatie met een varend schip in Delft3D te implementeren is niet verder onderzocht. Wanneer dit mogelijk is kan er een totaal plaatje gemaakt worden van de waterbewegingen rondom een schip.

Door de hoge verkeersintensiteiten op het kanaal zullen schepen elkaar veelvuldig oplopen of tegemoet komen. In deze situaties kunnen de schroefstraal van het ene schip en de retourstroom van een ander schip elkaar misschien gaan versterken. Het kan mogelijk zijn dat door deze combinatie van hydraulische belastingen een grotere erosie ontstaat. Hoeveel deze erosie is zal verder onderzocht moeten worden. Op dit moment zonder goed gevalideerd model is het niet mogelijk om hierover een uitspraak te doen.

In Delft3D is het in principe mogelijk om bij een goed gevalideerd 2D model de ondergrond in te voeren om zo verder te kunnen modeleren aan de morfologische kant van het verhaal.

7 Inpassen en toetsen van nieuw dwarsprofiel

Naar aanleiding van de voorgaande hoofdstukken wordt onderzocht of het kanaalprofiel optimaal ingepast kan worden op de onderzoekslocatie. Hierbij dient rekening gehouden te worden met de hydraulische belastingen in het kanaal, maar ook met verschillende omgevingsfactoren zoals de beschikbare ruimte op de locatie en de maatschappelijke ontwikkelingen.

7.1 Toetsen van dwarsprofiel aan gestelde eisen

De opdracht zoals geformuleerd in paragraaf 2.5 is:

Het ontwikkelen van een dwarsprofiel met stabiele oevers waarbij rekening gehouden wordt met toekomstige ontwikkelingen, duurzaamheid en recreatie.

Het nieuwe kanaalprofiel wordt getoetst aan de opdracht en het programma van eisen. Voor het toetsen zullen verschillende onderwerpen in het kort worden toegelicht.

Keuze kanaalprofiel

Uit de multi criteria analyse kwam kanaalprofiel (2) als goedkoopste uit. Kanaalprofiel (3) is wel duurder maar scoorde erg hoog op bijna alle criteria. In hoofdstuk 6 blijkt dat kanaalprofiel (3) ook nog eens heel goed scoort op de geringe erosie die optreedt ten opzichte van kanaalprofiel (2). Door de geringe erosie in kanaalprofiel (3) zijn de jaarlijkse baggerkosten veel lager dan in kanaalprofiel (2). Daardoor is na verloop van tijd kanaalprofiel (3) goedkoper dan kanaalprofiel (2). In hoofdstuk 6 is gebleken dat dit jaarlijks een verschil geeft van 400 m³ baggerwerk wat een prijsverschil geeft per jaar per strekkende meter van €4800,-. Kanaalprofiel (3) heeft een hogere investeringsprijs maar lage onderhoudskosten, wat op de lange termijn gunstig kan werken. Dit dient verder uitgewerkt te worden in een kostenbatenanalyse.

Bevaarbaarheid

Nat oppervlak

Het nieuwe kanaalprofiel heeft een oppervlak van 751 m² en voldoet daarmee ruim aan de minimale eis van 600 m². In profiel (3) is de breedte nagenoeg gelijk gebleven ten opzichte van de huidige situatie, maar de waterdiepte is toegenomen. Het grote nat oppervlak zorgt ervoor dat de schepen harder kunnen varen, maar ondanks deze hogere vaarsnelheid neemt de retourstroom niet toe. De retourstroom neemt zelfs af waardoor de optredende erosie minder wordt.

De toename van de vaarsnelheid geldt alleen voor de grotere schepen ($b_s > 13,0$ meter). Op het Amsterdam-Rijnkanaal is de maximale vaarsnelheid 18 km/uur. De grote schepen halen deze snelheid niet, maar kunnen bij toename van het nat oppervlak wel harder varen dan in de huidige situatie.

Golfhinder

Toepassen van het talud dat begint op één meter onder de waterspiegel en oploopt met een helling van 1:3 geeft golfdemping, waardoor het klotseffect verminderd wordt.

Oeverzuiging

Dit probleem is naar verwachting iets minder in het nieuwe ontwerp. Doordat er direct naast de damwand een waterdiepte is van 6,00 meter zal de stroming lager zijn dan in de huidige situatie, waardoor de oeverzuiging zal afnemen. Het fenomeen blijft echter wel bestaan in alle kanaalprofielen, maar is in kanaalprofiel (3) het minst.

Levensduur nieuwe oeverconstructie minimaal 50 jaar, stabiele oever constructie

De nieuwe damwanden, die gebruikt worden voor het nieuwe kanaalprofiel, kunnen behandeld worden waardoor roestvorming tegengegaan wordt. De taludoever dient zo gedimensioneerd te worden dat de oeverconstructie 50 jaar dient mee te gaan. De stabiliteit van de oeverconstructie is een ander verhaal. Dit gaat gepaard met de verwachting van erosie, zoals dat geformuleerd is in hoofdstuk 6. De berekening op de kans van falen van de oeverconstructie is verder niet uitgewerkt in dit rapport, maar is voor een totaalplaatje wel van belang.

Waterkering dient aan de geldende eisen te voldoen of de kwaliteit van de waterkering dient minimaal gelijk te zijn aan de huidige situatie

Uit onderzoek is gebleken dat de Westelijke kanaaldijk niet voldoet aan de geldende eisen conform de wet op de waterkeringen. Toetsingen laten zien dat de dijk gemiddeld ongeveer één meter te laag is en op veel plaatsen te smal. In dit onderzoek is hier verder niet op in gegaan. Door een kanaalprofiel met een oeverconstructie aan te leggen, waarbij de erosie in het kanaalprofiel kleiner is, ontstaat er een situatie waarbij het falen van de oeverconstructie kleiner zal zijn. Hierbij zal de huidige kwaliteit van de waterkering gehandhaafd blijven.

Stabiele oeverconstructie

De oeverconstructie kan opgedeeld worden in twee constructie onderdelen: de damwand en het talud.

Om een stabiele damwandconstructie te maken met een levensduur van 50 jaar, dient rekening gehouden worden met optredende erosie. In kanaalprofiel (3) is de optredende erosie minimaal waardoor een oeverconstructie gedimensioneerd kan worden die tegemoet komt aan de gestelde eisen.

Door golfbelastingen zal een oeverbescherming op het talud aangebracht dienen te worden. Dit kan bijvoorbeeld in de vorm van een breuksteen bestorting. Het berekenen van een dergelijke bestorting is in het verleden vaker gedaan en zal dus geen problemen geven. De maatgevende scheepsgolven worden gegenereerd door een patrouillevaartuig van Rijkswaterstaat. Deze generen, net als sleepboten, een hoge golfbelasting en zijn daardoor maatgevend voor de dimensionering van de oeverconstructie. Ook grote recreatiejachten kunnen hoge golven creëren die maatgevend kunnen zijn voor de bepaling van de breukstenen oever. Het betreft hier golven in de orde van 0,5 tot 1,0 meter waarbij een sortering van 10-60 kg vaak toegepast wordt.

Mogelijkheden voor aanleg natuurvriendelijke oevers

De taludoever die in kanaalprofiel (3) gebruikt wordt, geeft mogelijkheden voor een natuurvriendelijke oever. Van belang is dat het toepassen van verschillende typen natuurvriendelijke oevers en materialen de diversiteit van het Amsterdam-Rijnkanaal kunnen verbeteren, zodat het kanaal beter in het landschap past. Hierbij kan inspiratie uit de omgeving gehaald worden zodat de kanaaloever goed aansluit bij het achterland. Door afwisselende natuurvriendelijke oevers aan te leggen, zal er een divers geheel ontstaan. Voor de keuze van de verschillende materialen, mogelijkheden en aanplanting wordt verwezen naar [CUR 202, 1999].

Recreatie

Het is gebleken dat rondom het Amsterdam-Rijnkanaal veel recreatie is. Bij het aanleggen van een natuurvriendelijke oever dient ruimte gereserveerd te worden voor de sportvisserij die veel gebruik maakt van het kanaal. Dit kan in de vorm van kleine vissteigers.

Door het talud 1:3 zoals in kanaalprofiel (3) toegepast is, ontstaat er een veilige situatie. Te water geraakte mensen kunnen namelijk makkelijker uit het water komen door gebruik te maken van de taludoever. Bij een damwand die één meter boven de waterspiegel uitsteekt is dit moeilijker zo niet onmogelijk. De taludoever geeft dat mensen dicht bij het water kunnen komen en zo een directe beleving met het water hebben.

Verder dient een fietspad langs het kanaal van voldoende kwaliteit te zijn zodat fietsers, skaters, hardlopers en wandelaars hier gebruik van kunnen maken. Ook de continuïteit van de fietspaden dient verbeterd te worden.

Golven dempen uit op het talud, waardoor een rustiger vaarbeeld ontstaat. Dit vaart voor de pleziervaart ook een stuk rustiger. Het beleid van Rijkswaterstaat is wel zo ingericht, dat recreatievaart niet aangemoedigd wordt om via het Amsterdam-Rijnkanaal te varen, maar dit weerhoudt de recreatievaart niet om alsnog gebruik te maken van het kanaal.

7.2 Inpassen nieuw kanaalprofiel

In deze paragraaf zal het nieuwe kanaalprofiel ingepast worden op de onderzoekslocatie. Verder wordt aandacht besteed aan de mogelijkheden en problemen die kunnen optreden wanneer het kanaalprofiel ingepast wordt op andere locaties. Doordat het kanaalprofiel ontworpen is als een representatief kanaalprofiel is het gemakkelijk inpasbaar op andere locaties en met enige aanpassingen op andere locaties.

7.2.1 Inpassen nieuw kanaalprofiel op onderzoekslocatie

Het kanaalprofiel (3) heeft beperkte ruimte nodig en is daardoor gemakkelijk in te passen op de onderzoekslocatie. De volgende zaken kunnen problemen geven:

- Brugpijlers bij bruggen over het kanaal;
- De aanlegsteiger van het fiets-/voetveer net boven Breukelen;
- Het zijkanaaltje bij Nieuwersluis waarvoor andere oplossingen gevonden dienen te worden;

Dit zijn echter maar kleine trajecten waar lokaal naar oplossingen gezocht dient te worden. Het traject ligt overwegend in landelijk gebied waardoor een natuurvriendelijke oever een mooie inpassing geeft met de omgeving. Door een ecoloog kunnen variaties gemaakt worden in de aanplant en toepassing van verschillende materialen in het bovenste gedeelte van het talud, om zo de diversiteit van de flora en fauna te garanderen. Hierdoor kan het kanaalprofiel aangepast worden aan de omgeving, zodat een gevarieerd kanaal ontstaat. In dit kanaal kan een beroepsschipper met plezier varen en een recreant volop genieten. Ook de flora en fauna kunnen in dit kanaalprofiel tot bloei komen. Bij het toepassen van duurzame materialen zal het geheel een verwachte levensduur van 50 jaar goed kunnen doorstaan. Verder dient voor het ontwerp van de oeverconstructie de erosie mee genomen te worden.

7.2.2 Inpassen kanaalprofiel op andere locaties

Wanneer het kanaalprofiel om welke reden dan ook anders uitgevoerd wordt, dient rekening gehouden te worden met het minimale nat oppervlak van 600m². Waar dit oppervlak toegepast wordt, dient rekening gehouden te worden met een toename van de optredende erosie ten opzichte van het oppervlak behorende bij kanaalprofiel (3). Verder dient rekening gehouden te

worden met de afname van de bevaarbaarheid ten gevolge van een kleiner nat oppervlak. Ook kan een inhaalverbod of snelheidsbeperkende maatregel genomen worden op plaatsen waar het minimale nat oppervlak van 600 m² niet gehaald kan worden om op die manier de hydraulische belastingen te verlagen en de veiligheid voor de scheepvaart te waarborgen.

Verder kan in de stedelijke gebieden ruimte genomen worden voor wonen aan het water of het realiseren van een boulevard met een afmeerplaats voor cruiseschepen. Binnen stedelijk gebied is een park, wat zicht heeft op het Amsterdam-Rijnkanaal, een mogelijkheid om de leefbaarheid in het gebied te verhogen. Verder zijn er nog tal van mogelijkheden, waarbij vele verschillende functies gekoppeld kunnen worden aan het Amsterdam-Rijnkanaal. Dit dient per locatie onderzocht te worden, daarbij rekening houdend met de eisen en wensen van de betrokken partijen. Het nieuwe kanaalprofiel biedt door zijn ruime inpassingsmogelijkheden de mogelijkheid om voor 2018 ruim 30 kilometer oeverconstructie aan te passen.

8 Conclusies

In dit hoofdstuk worden verder de conclusies gegeven geordend per categorie:

Algemeen

- Instabiliteit van de damwanden op het kanaal komt voor op de volgende plaatsen:
 - Locaties met onvoldoende nat profiel $< 600 \text{ m}^2$ (voldoen niet aan de wens van Rijkswaterstaat);
 - Locaties waar veel gemanoevreerd wordt door schepen;
 - Vaarwegen waar het gemiddeld laadvermogen en motorvermogen van de vloot de afgelopen tien jaar sterk is toegenomen;
 - Rechte kanaalgedeeltes (hierop is in dit rapport verder ingegaan);
- De toegestane diepgang in het Amsterdam-Rijnkanaal is vergroot in 1988 van 3,30 m naar 4,00 m. Eind jaren '90 verscheen de nieuwe generatie grotere binnenvaartschepen (schaalvergroting). Eind jaren '90 werden de eerste ontgrondingen geconstateerd. Tussen deze ontwikkelingen zit een mogelijke relatie.

Scheepvaart

- De verkeersintensiteit is de laatste decennia op het Amsterdam-Rijnkanaal ongeveer gelijk gebleven maar het aantal vervoerde tonnen is toegenomen. Dit komt doordat het gemiddelde laadvermogen is toegenomen (schaalvergroting);
- Door de schaalvergroting genereren schepen hogere hydraulische belastingen;
- De maatgevende scheepscombinatie is het oplopen van een vierbaksduwstel (200x22,80x4,00 m) door een Rijnmaxschip (135x17,00x4,00 m).

Model/hydraulische belastingen

- Het oplopen van twee schepen is een maatgevende situatie voor het bepalen van de hydraulische belastingen;
- Maatgevende belasting voor berekening van de erosie is de retourstroom;
- Het gebruik van de boegschroef en de hoofdschroef bij varende schepen ($0,7V_{lim}$) is niet maatgevend voor de belasting op de bodem of oeverconstructie;
- Gebruik van DIPRO voor één schip geeft goede resultaten;
- Gebruik van Delft3D voor twee schepen geeft gedetailleerdere informatie dan het gebruik van DIPRO. Delft3D kan niet nauwkeuriger gevalideerd worden, wel geeft het een duidelijker beeld van de interactie tussen twee schepen.

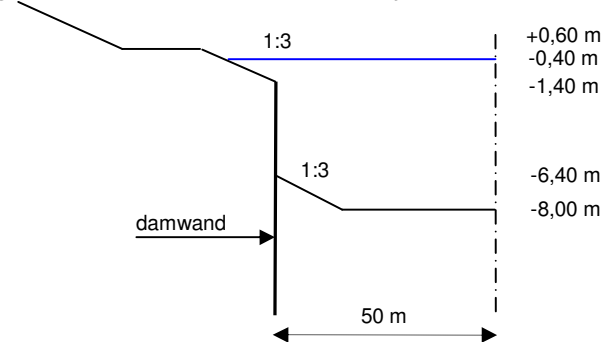
Vergelijking kanaalprofielen

- Uit de multicriteria-analyse blijkt dat kanaalprofiel (3) het hoogste scoort vanuit verschillende gezichtspunten;
- Kanaalprofiel (2) geeft de laagste prijs per punt, maar omdat het veel meer erosie geeft dan kanaalprofiel (3) valt dit profiel af.

Nieuw kanaalprofiel (3)

- Kanaalprofiel (3) is een robuust en representatief kanaalprofiel wat toekomstbestendig is. Een halve dwarsdoorsnede is te zien in figuur 8.1;
- Het kanaalprofiel (3) bestaat uit een gebroken bakprofiel met een damwand en een onderwatertalud. De oever heeft een talud van 1:3;

- Dit profiel is representatief voor het Amsterdam-Rijnkanaal en daardoor goed inpasbaar op het grootste gedeelte van het Amsterdam-Rijnkanaal;



Figuur 8-1: Representatief kanaalprofiel voor Amsterdam-Rijnkanaal (kanaalprofiel (3))

- Het geeft door het groter natte oppervlak een goede bevaarbaarheid, schepen kunnen ook harder varen door het groter nat oppervlak;
- Zorgt voor minder oeverzuiging bij het uit de as varen ten opzichte van de andere profielen, het zal niet geheel weggenomen worden, hiermee dienen schippers rekening te houden;
- Door het combineren van een damwand met een taludoever kunnen de ruimtebesparende eigenschappen van de damwand benut worden samen met de voordelen van een talud;
- Uitdemping van golven, waardoor het kanaal beter bevaarbaar wordt voor de kleinere beroepsvaart en de recreatie vaart.

Erosie

- Hogere hydraulische belastingen van de scheepvaart veroorzaken meer erosie, deze hogere hydraulische belastingen zijn mogelijk een gevolg van de schaalvergroting;
- In kanaalprofiel (2) ontstaat 2x zoveel erosie als in kanaalprofiel (3), dit volgt direct uit het groter nat oppervlak in kanaalprofiel (3).

Maatschappelijk

- Door geringe benodigde ruimte geen grote veranderingen in de omgeving;
- De taludoever biedt voor verschillende doelgroepen een kans om te recreëren;
- Aanleg van natuurvriendelijke oevers. Deze oevers kunnen goed ingepast worden in het landschap, harde barrière wordt opgeheven wat de uitwisseling van flora en fauna ten goede komt;
- Recreatieve invulling van de oever, zoals de aanleg van vissteigers en of 'knuppelpaden langs een natuurvriendelijke oever;
- Door de oever zodanig in te richten dat het kanaal aantrekkelijker wordt zal het industriële karakter van de vaarweg verminderd worden;
- Veilige situatie, zodat te water geraakte mensen gemakkelijk uit het kanaal kunnen komen.

Het resultaat van dit afstudeerproject is een nieuw kanaalprofiel voor het Amsterdam-Rijnkanaal. Hierbij veroorzaakt de maatgevende hydraulische belasting (retourstroom) minimale erosie zodat verwacht kan worden dat de oeverconstructie stabiel blijft. Verder kunnen natuur en recreatie goed samen gaan en zijn maatschappelijke ontwikkelingen meegenomen in het ontwerp.

9 Aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden aanbevelingen genoemd die nodig zijn om het ontwerp verder en nauwkeuriger te kunnen uitwerken.

Algemeen

- Monitoren van oevers om problemen tijdig te signaleren en actie te ondernemen;
- Zorgen voor een totaal oplossing, waarin rekening gehouden wordt met scheepvaart, maatschappelijke ontwikkelingen en andere zaken die spelen rondom het kanaal.

Scheepvaart

- Onderzoek naar gebruik van (boeg-)schroefvermogens tijdens het varen in het kanaal, om zo de hydraulische belastingen en erosie nauwkeuriger te bepalen;
- Verder onderzoeken of de schroefstralen bij oplopende schepen de retourstroom versterken. Zo ja, hoe groot is deze invloed op de bodem;
- Onderzoek naar hydraulische belastingen van meerdere kleinere schepen in één dwarsprofiel. (Veelvuldig oplopen en passeren met hogere snelheden en dicht langs oeverconstructie varen);
- Het is van belang voor het nieuwe kanaalprofiel dat Rijkswaterstaat de vaarsnelheden van schepen op het Amsterdam-Rijnkanaal verstrekt, zodat hydraulische belastingen nauwkeuriger in beeld gebracht kunnen worden (gemiddelde snelheden per CEMT-klasse);
- Maken van prognoses voor de verkeersintensiteit, daarbij rekening houden met de schaalvergroting, dit geldt in het bijzonder voor de grootste schepen in de binnenvaartvloot.

Erosie

- Verschilkaarten maken door jaarlijkse peilingen te vergelijken om zo inzicht te krijgen in het verplaatsen en/of dichtslibben van erosiekuilen;
- Verder onderzoek doen naar de optredende erosiekuilen, om zo een maximale kuildiepte te geven die nodig is voor een damwandberekening.

Model of hydraulische belastingen

- Metingen doen met meerdere schepen tegelijkertijd in één dwarsprofiel, om een 2D of 3D model te kunnen maken van de hydraulische belastingen rondom schepen;
- Wanneer voor een recht kanaaltraject de hydraulische belastingen bekend zijn, kan vervolgonderzoek gedaan worden naar de hydraulische belastingen in bochten en andere specifieke locaties in het kanaal, ook kan dan een nauwkeurigere uitspraak gedaan worden over de optredende erosie.

Maatschappelijk

- Om de leefbaarheid te vergroten rondom het kanaal kunnen bijvoorbeeld parken of boulevards aangelegd worden;
- Het bouwen van bijvoorbeeld luxe huizen/appartementen met insteekhovens, zodat jachten bij de huizen aan kunnen leggen;
- Faciliteiten aanbrengen om cruiseschepen te ontvangen;
- Continuïteit van fietspaden en wandelpaden waarborgen bij aanpassingen aan het kanaalprofiel;

- Het integraal aanpakken van problemen rondom het kanaal, zoals verhoging van de Westelijke kanaaldijk volgens de legger, vernieuwing oeverconstructie en het toepassen van maatschappelijke functies in het kanaal om een totaalplaatje te creëren.

Nieuw kanaalprofiel

- Een kosten-batenanalyse maken voor kanaalprofiel (2) en (3). Daarbij rekening houden met de vaarsnelheid van de schepen en het brandstof verbruik. Verder zijn ook de omgevingswaarde, onderhoudskosten en aanleg van het nieuwe kanaalprofiel van belang;
- Bij aanpassingen aan het ontworpen kanaalprofiel is het van belang dat de grootte van het natte oppervlak behouden blijft, bij verkleining van het natte oppervlak is de kans op erosie groter. Wanneer toch het natte oppervlak verkleind zal worden, kunnen oplossingen zoals een verstevigde oeverconstructie uitkomst bieden, of innovatieve oplossingen met versterkt sediment;
- Om beter inzicht te krijgen in het erosie patroon kan een proeftraject aangelegd worden in het Amsterdam-Rijnkanaal. Door intensief te monitoren en de uitvoer van peilingen in combinatie met het aantal gepasseerde schepen te vergelijken met de verwachte optredende erosie, kan eventueel het ontwerp aangepast worden aan nieuwe inzichten;
- Door het Amsterdam-Rijnkanaal te monitoren zijn alle gegevens van de schepen die over het kanaal varen bekend. Wanneer in de toekomst morfologische berekeningen gedaan worden voor het kanaal kan een representatief schip gekozen worden wat de vloot goed benaderd. Hiermee kan dan bv. een heel jaar gesimuleerd worden;
- Verdere uitwerking van een natuurvriendelijke oever voor het Amsterdam-Rijnkanaal;
- Verder uitwerking van de kostprijsberekening voor een nieuw kanaalprofiel, hierbij rekening houden met het verwijderen en afvoeren of eventueel hergebruik van de oude damwanden, evenals het opslaan van vrijkomende baggerspecie uit het kanaal;
- Rijkswaterstaat kan overwegen om voor deze grote schepen een snelheidslimiet in te stellen of een inhaalverbod. Om zo de hydraulische belastingen te verminderen, en daarbij ook de erosie;
- Als blijkt dat het kanaalprofiel (3) geen haalbare oplossing is, en dan met name door de hogere aanlegkosten, kan uitgeweken worden naar variant (2) of kan gezocht worden naar een tussenoplossing;
- Onderzoek naar doorsnijden van waterafsluitende lagen, in verband met de waterhuishouding in omliggende polders;
- Verder onderzoek doen naar duurzaamheid van het kanaalprofiel, daarbij rekening houden met de verschillende facetten van het begrip duurzaamheid. Bijvoorbeeld het productieproces van gebruikte materialen en de daarbij uitgestoten CO².

10 Literatuurlijst

Arcadis, *Rapport restlevensduur damwanden Amsterdam-Rijnkanaal 2^e fase*. Plaatsnaam, 2009.

Alkyon Hydraulic Consultancy & Research, *Schaalvergroting Binnenvaart, Gevolgen grotere schepen voor het vaarwegennet*. Marknesse, 2005.

Axeldongen, L.v., *Ontwerpnota (ON) Bodembescherming, locatie Diemen, Ontwerpen en realiseren van de renovatie van de meerplaatsen langs het Amsterdam-Rijnkanaal en Lekkanaal, UTI-7253*. Sliedrecht, 2008.

AVV publicatie *Nederland en de scheepvaart op de binnenwateren 2002*, Rijkswaterstaat Adviesdienst verkeer en vervoer & CBS taakgroep Verkeer en Vervoer, Nijkerk 2003.

Baars, K.E., *Varend vervoeren van Amsterdam tot de Rijn 100 jaar Merwedekanaal*. Stichting Matrijs 1991.

BPR '84, *Binnenvaart Politie Regelement '84*, Nederlandse uitgeverijmaatschappij B.V. Leiden 13^e druk, juli 1998

BPRW, *Beheer- en Ontwikkelplan voor de Rijkswateren 2010-2015-ontwerp*, Rijkswaterstaat, 2008

CIRIA, *Rock manual*, London 2007

CUR 200, *Natuurvriendelijke oevers, Aanpak en toepassingen*. Gouda, 1999.

CUR 201, *Natuurvriendelijke oevers, Belasting en sterkte*. Gouda, 1999.

CUR 202, *Natuurvriendelijke oevers, Oeverbeschermingsmaterialen*. Gouda, 1999.

Deltares, *Delft 3D Flow, Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments*, User manual, Version 3.14 Revision 7864, July 16, 2009

Deltares *Delft3D-Quickplot, Visualisation and animation program for analysis of simulation results, Version 2.15*, July 16, 2009.

DVS, Rijkswaterstaat Dienst Verkeer en Scheepvaart, *Concept rapport Actualisatie KBA Lekkanaal 3^e kolk Prinses Beatrixsluis, versie 3*, Delft, 19 februari 2008

Greup, G.M., *De Rijnverbinding van Amsterdam en haar geschiedenis*, Amsterdam, Becht 1952.

Hoffmans, G.J.C.M., H.J. Verheij, *Scour Manual*. Rotterdam, 1997.

Hove, D. ten 2008, *Herziening manoeuvreermiddelen*, Marin i.ov. Rijkswaterstaat Dienst Verkeer en Scheepvaart. Wageningen, 2008.

Kazi S.A, *Hydrodynamic modeling of vessel-induced water motion using Delft 2D rivers*, IHE thesis number:HE 009; 1998

Meene E.A, Meerkerk M. van, Staay van der J, *Toelichtingen bij de Geologische kaart van Nederland 1:50.000 Utrecht oost (310)*, Rijks Geologische Dienst, Haarlem 1988.

Meijer, D.G., Verheij, H.J. *Stroomsnelheden veroorzaakt door boegschroeven, verificatie van de berekeningsmethoden*. Waterloopkundig Laboratorium, Delft, 1994

Pratap, R. *Getting started with Matlab 7*, New York Oxford, 2006

Rijkswaterstaat, Dienst Verkeer en Scheepvaart, *Scheepvaartinformatie Hoofdvaarwegen*, editie 2008. Den Haag, 2008.

Rijkswaterstaat, Adviesdienst Verkeer en Vervoer, *Richtlijnen vaarwegen 2005*, Rotterdam 2005

Rijkswaterstaat, Adviesdienst Verkeer en Vervoer, *Prognose van de behoefte aan ligplaatsen in het Amsterdam-Rijnkanaal*. Brolsma,J.U. 2006.

Rijkswaterstaat, Dienst Utrecht, *Oeverplan Amsterdam-Rijnkanaal*, Utrecht 2006.

Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling, *Ontwerp natuurvriendelijke oever Amsterdam-Rijnkanaal Nigtevecht-west*. Lelystad, 2003.

Roelse, K. Bijlage 3 van het rapport Oeverplan Amsterdam-Rijnkanaal. *Scheepvaartaspecten*. Delft, 2005

Schouten, W. *Bijlage 4 Oeverplan Amsterdam-Rijnkanaal en Lekkanaal*. Rijkswaterstaat Utrecht 2005.

Schrierek, G.J., *Introduction to Bed, bank and shore protection, Engineering the interface soil and water*. Delft, 2004.

Verheij H.J, Stolker C, Groenveld R, *Inland Waterways, ports, waterways and inland navigation*. lecture notes CT4330 Delft 2008

Verheij, H. en Prooijen, B. van, *Verbetering DIPRO*, i.o.v. Rijkswaterstaat DWW, Delft 2007.

Wal van der, *Enkele aspecten van de scheepsgeïnduceerde waterbeweging in klasse IV vaarwegen*. verslag literatuurstudie R1894 WL hydraulics 1983.

Wal, M. van der, Struiksma, N. *Invloed van scheepvaart op een alluviale rivier*, Delft Waterloopkundig Laboratorium, 1984.

Waterloopkundig Laboratorium, *DIPRO 3.02 Gebruikershandleiding*, Delft 1997.

Wolters, M.A. *Capaciteit bepaling Prinses Beatrixsluis*, Rijkswaterstaat Adviesdienst Verkeer en Vervoer, Delft 2001.

M1115 XIX, *Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen, technische aanbevelingen voor oeververdedigingen van losgestorte steen*, Waterloopkundig Laboratorium, Delft 1988.

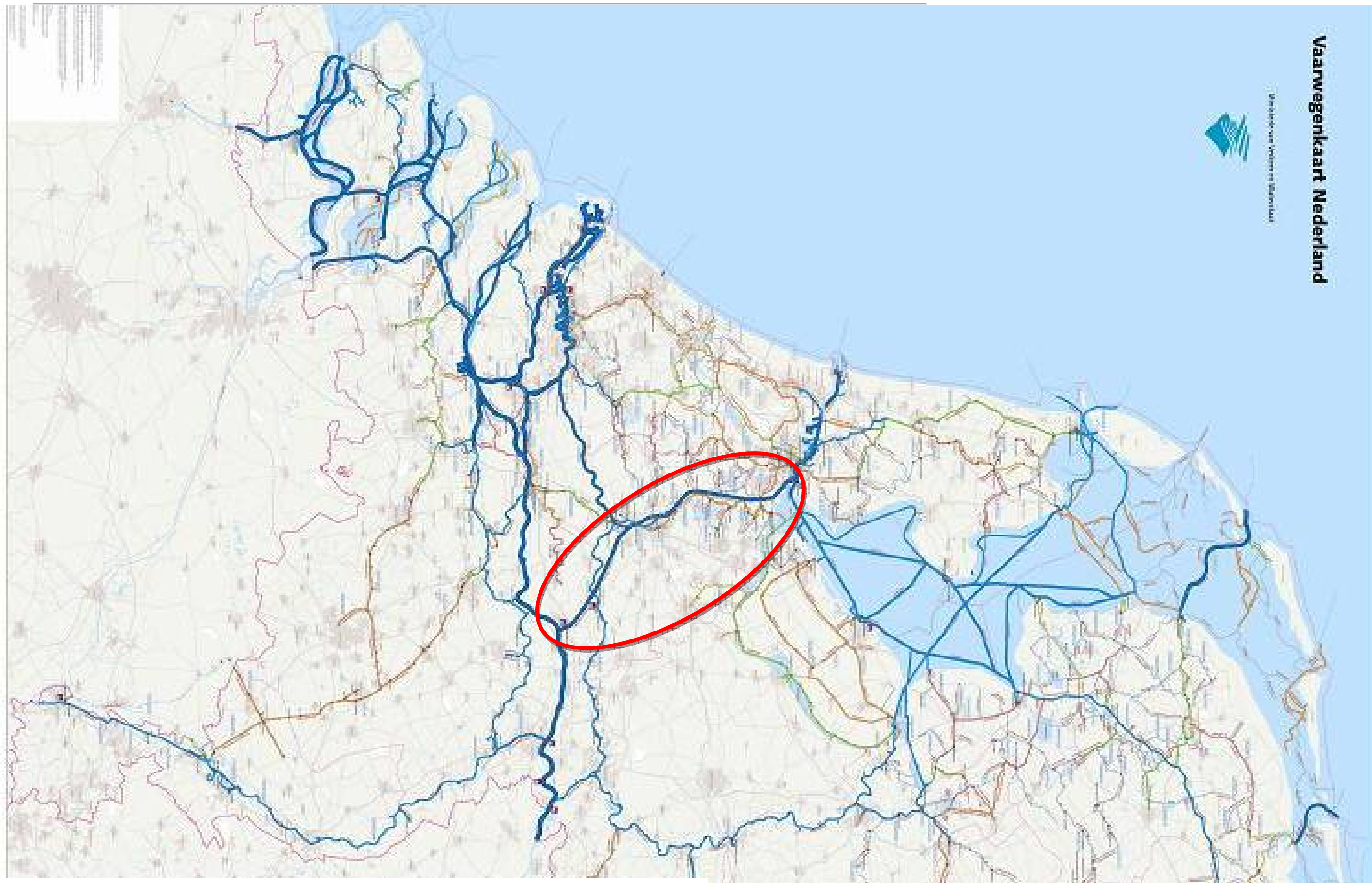
Rijkswaterstaat Waterdienst	www.helpdeskwater.nl
Leggerprofiel	www.helpdeskwater.nl
Bureau voor de binnenvaart	www.bureauvoorlichtingbinnenvaart.nl
Database met binnenvaartschepen	www.debinnenvaart.nl/schepen
Informatie over Rijkswaterstaat	www.rijkswaterstaat.nl
Figuur deellocatie	www.google.earth.com

Bijlagen

Bijlage 1	133
Bijlage 2	138
Bijlage 3	141
Bijlage 4	143
Bijlage 5	147
Bijlage 6	150
Bijlage 7	152
Bijlage 8	158

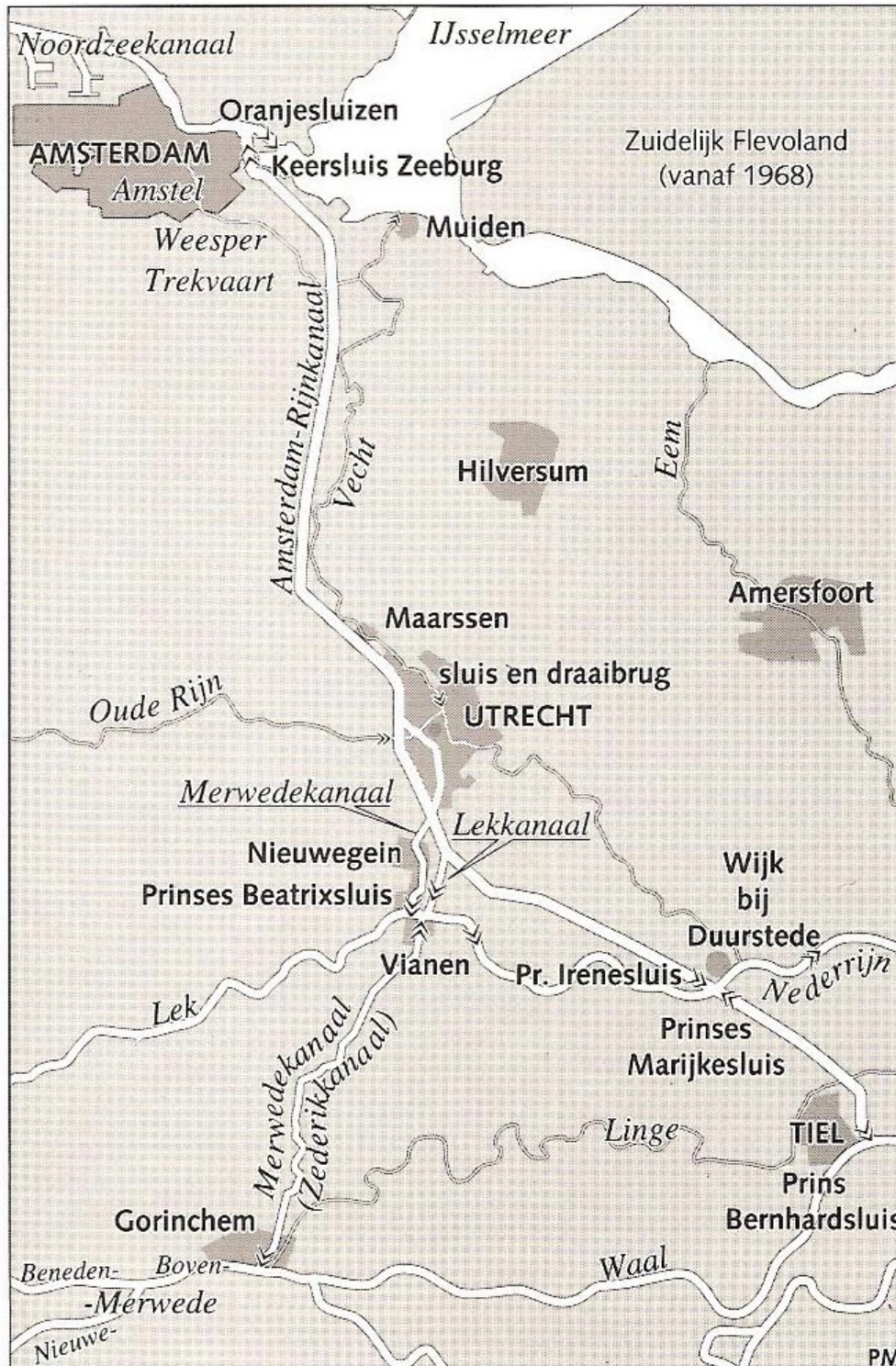
Bijlage 1

Overzichtskaart van Nederland de rode ellips geeft de locatie van het Amsterdam-Rijnkanaal aan.



Figuur 10-1: Overzichtskaart Nederland met daarin het Amsterdam-Rijnkanaal aangegeven

In de vorige figuur is aangegeven de locatie van het Amsterdam-Rijnkanaal. De volgende figuur geeft het Amsterdam-Rijnkanaal weer en de verschillende kanalen en rivieren die erop aansluiten. De cirkel die in deze figuur staat is het deelgebied wat verder onderzocht wordt.



Figuur 1-2: Amsterdam-Rijnkanaal

In onderstaande figuur is de deellocatie te zien die in hoofdstuk 4 gekozen is voor verder onderzoek. De verschillende kilometers staan aangegeven bij het kanaal.



Figuur 1-3: Onderzoekslocatie

In de figuur 1-3 is duidelijk te zien de spoorlijn die ten noorden van Loenen afbuigt richting Abcoude.
Van Loenen tot aan Breukelen ligt de spoorlijn vlak langs het kanaal.

Bijlage 2

Overzicht toegepaste scheepsklassen voor de binnenvaartvloot.

RWS/CBS-2008 Binnenvaartvloot Classificatie voor studies, statistiek en prognoses

CEMT Klasse	Motorvrachtschepen (Motorvessels)						Duwstellen (Barges)					Koppelverbanden (Convoys)					Doorvaart-hoogte* incl. 30 cm schrikhoogte						
	RWS Klasse	Karakteristieken maatgevend schip**			Classificatie		RWS Klasse	Karakteristieken maatgevend duwstel**			Classificatie		RWS Klasse	Karakteristieken maatgevend koppelverband**				Classificatie					
		Naam	Breedte	Lengte	Diepgang (geladen)	Laadvermogen		Breedte en lengte	Combinatie	Breedte	Lengte	Diepgang (geladen)		Laadvermogen	Breedte en lengte	Combinatie		Breedte	Lengte	Diepgang (geladen)	Laadvermogen	Breedte en lengte	
m	m	m	t	m	m	m	m	m	m	t	m	m	m	m	m	t	m						
0	M0	Overig				1-250	B<= 5,00 of L<= 38,00																
I	M1	Spits	5,05	38,5	2,5	251-400	B= 5,01-5,10 en L>=38,01	BO1		5,2	55	1,9	0-400	B<=5,20 en L= alle	C1i	2 spitsen lang	5,05	77-80	2,5	<= 900	B<= 5,1 en L=alle	5,25*	
														C1b	2 spitsen breed	10,1	38,5	2,5	<= 900	B=9,61-12,60 en L<= 80,00	5,25*		
II	M2	Kempenaar	6,6	50-55	2,6	401-650	B=5,11-6,70 en L>=38,01	BO2		6,6	60-70	2,6	401-600	B=5,21-6,70 en L=alle								6,1	
III	M3	Hagenaar	7,2	55-70	2,6	651-800	B=6,71-7,30 en L>=38,01	BO3		7,5	80	2,6	601-800	B=6,71-7,60 en L=alle								6,4	
	M4	Dortmund Eems (L <= 74 m)	8,2	67	2,7	801-1050	B=7,31-8,30 en L=38,01-74,00	BO4		8,2	85	2,7	801-1250	B=7,61-8,40 en L=alle								6,6	
	M5	Verl. Dortmund Eems (L > 74 m)	8,2	80-85	2,7	1051-1250	B=7,31-8,30 en L>=74,01															6,4	
IVa	M6	Rijn-Herne Schip (L <= 86 m)	9,5	80-85	2,9	1251-1750	B=8,31-9,60 en L=38,01-86,00	BI	Europa I duwstel	9,5	85-105	3,0	1251-1800	B=8,41-9,60 en L=alle								7,0*	
	M7	Verl. Rijn-Herne (L > 86 m)	9,5	105	3,0	1751-2050	B=8,31-9,60 en L>=86,01															7,0*	
IVb														C2i	Klasse IV + Europa I lang	9,5	170-185	3,0	901-3350	B=5,11-9,60 en L=alle		7,0*	
Va	M8	Groot Rijnschip (L <=111 m)	11,4	95-110	3,5		B= 9,61-11,50 en L=38,01- 111,0	BII-1	Europa II duwstel	11,4	95-110	3,5	1801-2450	B=9,61-15,10 en L<=111,00								9,1*	
	M9	Verlengd Groot Rijnschip (L >111 m)	11,4	135	3,5		B= 9,61-11,50 en L>= 111,01	BIIa-1	Europa Ila duwstel	11,4	92-110	4,0	2451-3200	B=9,61-15,10 en L<=111,00								9,1*	
								BIIb-1	Europa II Lang	11,4	125-135	4,0	3201-3950	B=9,61-15,10 en L=111,01-146,00								9,1*	
Vb								BII-2i	2-bakduwstel lang	11,4	170-190	3,5-4,0	3951-7050	B=9,61-15,10 en L>=146,01	C3i	Klasse Va + Europa II lang	11,4	170-190	3,5-4,0	3351-7250	B=9,61-12,60 en L>=80,01		9,1*
VIa	M10	Rijnmax Schip	17,0	135	4,0		B>= 11,51 en L>= 38,01	BII-2b	2-bakduwstel breed	22,8	95-145	3,5-4,0	3951-7050	B=15,11-24,00 en L<=146,00	C2b	Klasse IV + Europa I breed	19,0	85-105	3,0	901-3350	B=12,61-19,10 en L<=136,00		7,0* alleen voor klasse IV koppelverband
														C3b	Klasse Va +Europa II breed	22,8	95-110	3,5-4,0	3351-7250	B>19,10 en L<=136		9,1*	
Vib								BII-4	4-bakduwstel (incl. 3-baks lang)	22,8	185-195	3,5-4,0	7051-12000 (7051-9000)	B=15,11-24,00 en L=146,01-200	C4	Klasse Va + 3 Europa II	22,8	185	3,5-4,0	>=7251	B>12,60 en L>=136,01		9,1*
Vic								BII-6i	6-bakduwstel lang (incl 5-baks lang)	22,8	270	3,5-4,0	12001-18000 (12001-15000)	B=15,11-24,00 en L>=200,01								9,1*	
VIIa								BII-6b	6-bakduwstel breed (incl. 5-baks breed)	34,2	195	3,5-4,0	12001-18000 (12001-15000)	B>=24,01 en L=alle								9,1*	

* Bij de klassen I, IV, V en hoger zijn de doorvaarthoogtes aangepast voor 2 respectievelijk 3 en 4-laags containervervaart. (doorvaarthoogte op kanalen t.o.v. Maatgevend Hoog Water = 1% overschrijding/jaar)

** De karakteristieken van het maatgevend schip hebben in de lengte een marge van ± 1 meter en in de breedte van ± 10 cm

Een maatgevend schip is een schip waarvan de afmetingen bepalend zijn voor de dimensionering van de vaarweg en de kunstwerken daarin. Bij nieuwbouw wordt uitgegaan van het grootste maatgevende schip binnen een CEMT-klasse. Klasse M3, M4 en M6 mag alleen worden toegepast bij reconstructie van vaarwegen. De kleinste afmetingen van een maatgevend schip vormen de ondergrens om een vaarweg in een bepaalde gestandaardiseerde klasse in te delen.

Bijlage 3

Geologische bodemkaart

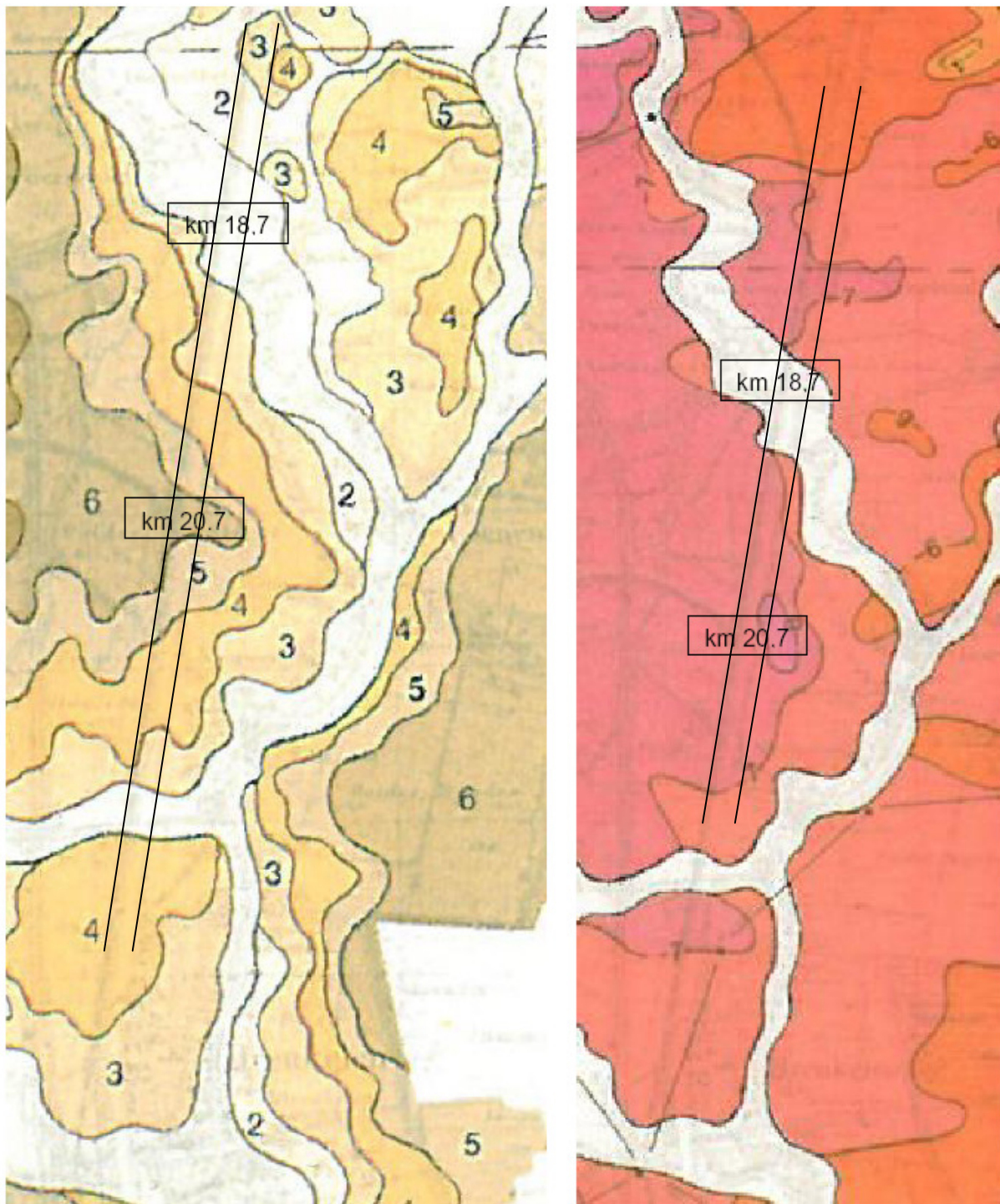
Het type ondergrond is belangrijk voor het uitspoelen van bodemmateriaal. In de geologische bodemkaart is informatie aanwezig over de grondlagen en welke grondsoort daar aanwezig is. Van de pleistocene zandlagen kan grofweg gezegd worden wat de korrelafmetingen zijn. Een nadeel van de geologische kaart is de grote schaal die de kaart heeft 1:50.000. Hierdoor zullen uitspraken aan de hand van deze kaart dan ook nog verder onderzocht moeten worden.

Op de onderzoekslocatie is ontgroning opgetreden, wanneer de geologische kaart van Utrecht oost (deelkaart gesommeerde veendikte [Westland formatie]) daarnaast gelegd wordt is op de plaats waar de meeste ontgroning voorkomt de dikste veenlaag aanwezig. Deze veenlaag loopt door tot een dikte van zes a zeven meter onder het maaiveld. Omdat het kanaal in veel gevallen hoger ligt dan het maaiveld, kan deze veenlaag ook voorkomen in het kanaal bij een waterdiepte van 6 meter.

In figuur 3-1 die ontleend is uit de Geologische bodemkaart Utrecht Oost [Meene, 1988] is het Amsterdam-Rijnkanaal te zien (twee zwarte lijnen), met daaromheen de verschillende grondlagen. In de linker figuur is de gesommeerde veenafzetting te zien die uitgedrukt wordt in meters onder het maaiveld. In de rechterfiguur is de bovenkant van de door de Westland Formatie bedekte Pleistoceen: in meters - NAP. Hierin is duidelijk te zien dat zowel de veenlagen als de Pleistocene afzetting een rol spelen als ondergrond voor het Amsterdam-Rijnkanaal.

Omdat de grondlagen in de toelichting op de geologische kaart verder uitgewerkt worden en daarbij ook korrelgroottes en verschillende grondsoorten worden benoemd, geeft dit een indicatie van de ondergrond.

Zo is de bovenste laag van het Pleistoceen een zandlaag door ionische afzetting. Dit houdt in dat het vooral bestaat uit zand wat door wind is getransporteerd. Deze windafzettingen zijn heel fijnkorrelig. (50-150 μm). In de berekeningen voor de erosie is de korrelgrootte van 150 μm voor zand aangehouden.



Figuur 3-1: Ondergrond Amsterdam-Rijnkanaal, linker figuur veendikte rechter figuur pleistocene zandlaag

Bijlage 4

Deze tabel geeft per kilometer aan wat de hoogte is van de huidige dijk (toetspeil) en wat de kruinhoogte van deze dijk dient te zijn volgens het leggerprofiel.

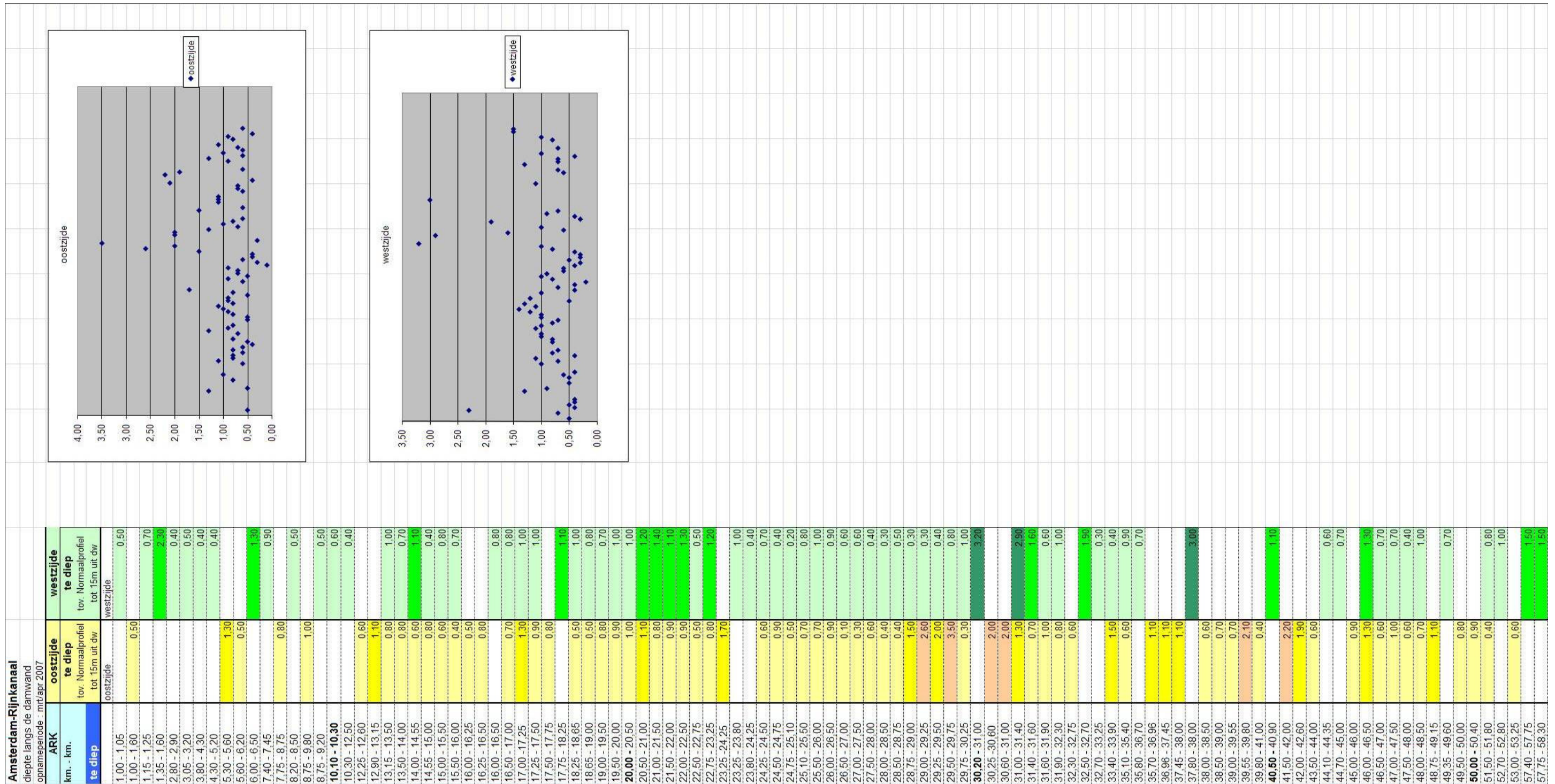
sectie	van	tot	profiel	toetspeil	Kruinhoogte Leggerprofiel
(nr)	(km)	(km)	[km]	[NAP m]	[NAP m]
1	0,950	- 1,370	1,250	1,00	2,00
2	1,370	- 2,400	2,000	1,20	2,20
3	2,400	- 4,700	4,400	1,40	2,40
4	4,700	- 6,700	5,300	1,50	2,50
5	6,700	- 9,800	9,250	1,60	2,60
6	9,800	- 13,300	11,650	1,60	2,60
7	13,300	- 17,500	14,300	1,60	2,60
8	17,500	- 19,500	17,850	1,70	2,70
9	19,500	- 22,000	20,500	1,70	2,70
10	22,000	- 23,700	22,950	1,70	2,70
11	23,700	- 27,100	26,000	1,70	2,70
12	27,100	- 29,700	29,250	1,80	2,80
13	29,700	- 32,000	30,350	1,90	2,90
14	32,000	- 32,800	32,300	2,20	3,20
15	32,800	- 35,200	NB.	2,20	3,20
16	35,200	- 35,300	NB.	2,20	3,20
17	35,300	- 37,500	36,250	2,40	3,40
18	37,500	- 39,300	38,750	2,80	3,80
19	39,300	- 41,000	40,500	3,10	4,10
20	41,000	- 42,750	42,000	3,20	4,20
21	42,750	- 45,100	44,000	3,20	4,20

Tabel 4-1: Hydraulische randvoorwaarden C-kering 2006-2011 Westlijke kanaaldijk Amsterdam-Rijnkanaal

Bijlage 5

Ontgrondingen Amsterdam-Rijnkanaal.

In deze bijlage staat een tabel met daarin de ontgrondingen die gemeten zijn op 15 meter uit de damwand.



Bijlage 6

Kostenoverzicht drie verschillende varianten.

Alle prijzen zijn directe kosten met een bandbreedte van 35%. De staartkosten zijn gesteld op 75%. Het prijspeil is 1 januari 2010. Prijzen zijn ontleend aan Rijkswaterstaat via dhr. P. Deenen.

De prijzen zijn per strekkende meter van het kanaal inclusief de oeverconstructies aan de oostzijde en aan de westzijde van het kanaal.

Kosten variant 1	Aantal	Eenheid	p.p.e. €	Kosten
Leveren en aanbrengen stalen damwand met kerende hoogte van 7 meter (AZ18 L=11m)	1,00	m	120,00	€ 120,00
Gording	1,00	m	195,00	€ 195,00
Bijbehorend groutanker Lengte 20 m	0,25	stuk	1655,00	€ 413,75
Baggerwerk Met kraanschip op ponton	15,36	m ²	12,00	€ 184,32
Subtotaal				€ 913,07
Kanaalzijden	2			€ 1826,14
Staartkosten 75%	0,75		1826,14	€ 1369,61
Totaal				€ 3195,75

Kosten variant 2	Aantal	Eenheid	p.p.e. €	Kosten
Leveren en aanbrengen stalen damwand met kerende hoogte van 5 meter (AZ13 L=8m)	1,00	m	110,00	€ 110,00
Gording	1,00	m	195,00	€ 195,00
Bijbehorend groutanker Lengte 20 m	0,25	stuk	1655,00	€ 413,75
Baggerwerk Met kraanschip op ponton	15,36	m ²	12,00	€ 184,32
Talud bescherming Stortsteen 10-60 kg	6,00	m ²	40,00	€ 240,00
Subtotaal				€ 1143,07
Kanaalzijden	2			€ 2286,14
Staartkosten 75%	0,75		2286,14	€ 1717,61
Totaal				€ 4000,75

Kosten variant 3	Aantal	Eenheid	p.p.e. €	Kosten
Leveren en aanbrengen stalen damwand met kerende hoogte van 5 meter (AZ18 L=11m)	1,00	m	120,00	€ 120,00
Gording	1,00	m	195,00	€ 195,00
Bijbehorend groutanker Lengte 20 m	0,25	stuk	1655,00	€ 413,75
Baggerwerk Met kraanschip op ponton	91,52	m ²	12,00	€ 1098,24
Talud bescherming Stortsteen 10-60 kg	6,00	m ²	40,00	€ 240,00
Subtotaal				€ 2066,99
Kanaalzijden	2			€ 4133,98
Staartkosten 75%	0,75		4133,98	€ 3100,46
Totaal				€ 7234,47

Van belang is dat bij het baggerwerk de los- en stortkosten er nog bijkomen, deze zijn afhankelijk van de stortlocatie en de kwaliteit van de baggerspecie. Het verwijderen en afvoeren van damwanden wordt verder niet meegenomen in deze studie. Verder is geen rekening gehouden met het onderhoud in de verschillende alternatieven, de prijs dient alleen als indicatie voor het vergelijken van de alternatieven.

Bijlage 7

In deze bijlage zal het script wat gebruikt wordt door Delft3D gegeven worden, en het script wat nodig is voor de windfile zal ook gegeven worden. De windfile script is gemaakt in Matlab.

Script Delft3D:

Dit script is voor twee schepen in het kanaal.

```

Ident = #Delft3D-FLOW .03.02 3.41.02#
Commnt=
Runtxt= #ark lang grid snelheid is 4m/s jen 2m/s#
Filcco= #grid2schepen.grd#
Fmtcco= #FR#
Anglat= 0.0000000e+000
Grdang= 0.0000000e+000
MNKmax= 1502 102 1
Thick = 1.0000000e+002
Commnt=
Depuni= 6.4000000e+000
Commnt=
Commnt=          no. dry points: 0
Commnt=          no. thin dams: 0
Commnt=
ltdate= #2009-11-05#
Tunit = #M#
Tstart= 0.0000000e+000
Tstop = 4.0000000e+001
Dt   = 0.005
Tzone = 0
Commnt=
Sub1 = # W #
Sub2 = # #
Commnt=
Wnsvwp= #Y#
Filwnd= #windboeg1.wnd#
Fmtwnd= #FR#
Wndint= #Y#
Commnt=
Zeta0 = -4.0000000e-001
U0   = [.]
V0   = [.]
S0   = [.]
Commnt=
Commnt=          no. open boundaries: 0
Commnt=
Ag   = 9.8100000e+000
Rhow = 1.0000000e+003
Alph0 = [.]
Tempw = 1.5000000e+001
Salw = 3.1000000e+001

```


Rouwav= # #
 Wstres= 6.3000000e-004 0.0000000e+000 7.2300000e-003 1.0000000e+002
 Rhoa = 1.0000000e+000
 Betac = 5.0000000e-001
 Equili= #N#
 Tkemod= # #
 Ktemp = 0
 Fclou = 0.0000000e+000
 Sarea = 0.0000000e+000
 Temint= #Y#
 Commnt=
 Roumet= #W#
 Ccofu = 5.0000000e-003
 Ccofv = 5.0000000e-003
 Xlo = 0.0000000e+000
 Vicouv= 1.0000000e+000
 Dicouv= 1.0000000e+001
 Htur2d= #N#
 Irov = 0
 Commnt=
 lter = 2
 Dryflp= #YES#
 Dpsopt= #MAX#
 Dpuopt= #MIN#
 Dryflc= 1.0000000e-001
 Dco = -9.9900000e+002
 Tlfsmo= 1.8000000e+001
 ThetQH= 0.0000000e+000
 Forfuv= #Y#
 Forfww= #N#
 Sigcor= #N#
 Trasol= #Cyclic-method#
 Momsol= #Cyclic#
 Commnt=
 Commnt= no. discharges: 0
 Commnt= no. observation points: 14
 Filsta= #obs.obs#
 Fmtsta= #FR#
 Commnt= no. drogues: 0
 Commnt=
 Commnt=
 Commnt= no. cross sections: 0
 Commnt=
 SMhydr= #YYYYYY#
 SMderv= #YYYYYY#
 SMproc= #YYYYYYYYYYYY#
 PMhydr= #YYYYYY#
 PMderv= #YYYY#
 PMproc= #YYYYYYYYYYYY#
 SHhydr= #YYYYY#
 SHderv= #YYYYYY#

SHproc= #YYYYYYYYYYY#
SHflux= #YYYYY#
PHhydr= #YYYYYYY#
PHderv= #YYY#
PHproc= #YYYYYYYYYYY#
PHflux= #YYYYY#
Online= #N#
Waqmod= #N#
Flmap = 0.0000000e+000 0.1 4.0000000e+001
Flhis = 0.0000000e+000 0.1 4.0000000e+001
Flpp = 0.0000000e+000 0.1 4.0000000e+001
First = 10
Commnt=
PavBnd= 100000
Zmodel= #Y#
Zbot = -6.41
Ztop = 1
Theta = 0.5
Commnt=

Mathlab script:

```

%Makewindfile.m
%Settings
filename = 'windboeg1.wnd';
%Settings voor schip 1
nmax = 102;
mmax = 1502;
WEW = zeros([nmax,mmax]); %Wind oost-west
WNS = zeros([nmax,mmax]); %Wind noord-zuid
P = zeros([nmax,mmax]); %Drukveld
%P(6:11,2:42) = 0; %Boot

Paddit = zeros([nmax,mmax]); %Drukveld
Paddit(17:37,3:39) = 98.1; %Boot
Paddit(17:37,1) = 30;
Paddit(17:37,2) = 60;
Paddit(17:37,40) = 40;
Paddit(18:35,41) = 20;
Paddit(20:30,42) = 10;

stappen = 1442;
tijdstap = 40/stappen %minuten de tijd die gezet wordt boven file
gridsize = 3.33; %meter;
snelheid = gridsize/tijdstap/60.00;
disp(['Snelheid schip P = ',num2str(snelheid), ' m/s']);

%Settings voor schip 2
Q = zeros([nmax,mmax]); %Drukveld
%Q(20:25,2:42) = 0; %Boot 2

Qaddit = zeros([nmax,mmax]); %Drukveld
Qaddit(54:71,3:39) = 98.1; %Boot
Qaddit(54:71,1) = 30;
Qaddit(54:71,2) = 60;
Qaddit(54:71,40) = 40;
Qaddit(57:68,41) = 20;
Qaddit(60:65,42) = 10;

stappenQ = 1442;
tijdstapQ = 40/stappenQ %minuten;
gridsizeQ = 6.66; %meter;
snelheidQ = gridsizeQ/tijdstapQ/60.00;
disp(['Snelheid schip Q = ',num2str(snelheidQ), ' m/s']);

S = Q+P;

%Write file
fid = fopen(filename,'w');
fprintf(fid,'FileVersion = 1.02\n');
fprintf(fid,'Filetype = meteo_on_flow_grid\n');
fprintf(fid,'NODATA_value = -999.000\n');
fprintf(fid,'grid_file = gridlang.grd\n');
fprintf(fid,'grid_unit = m\n');

```

```

fprintf(fid, 'value_pos      = centre\n');
fprintf(fid, 'n_quantity    = 3\n');
fprintf(fid, 'quantity1     = x_wind\n');
fprintf(fid, 'quantity2     = y_wind\n');
fprintf(fid, 'quantity3     = air_pressure\n');
fprintf(fid, 'unit1        = m s-1\n');
fprintf(fid, 'unit2        = m s-1\n');
fprintf(fid, 'unit3        = Pa\n');

for t = 1:400
    if (t>1)
        Paddit = circshift(Paddit,[0 1]); %Schuif additioneel drukveld een
roostercel door...
        P = circshift(P+Paddit,[0 1]); %Schuif drukveld een roostercel door...
        S = P + Q;
    end
    fprintf(fid, 'TIME = %0.5f minutes since 2009-11-05 00:00:00 +00:00\n', (t-
1.00)*tijdstap);

    for n = 1:nmax
        fprintf(fid, '%i ', WEW(n,1:mmax-1));
        fprintf(fid, '%i\n', WEW(n,mmax));
    end
    for n = 1:nmax
        fprintf(fid, '%i ', WNS(n,1:mmax-1));
        fprintf(fid, '%i\n', WNS(n,mmax));
    end
    for n = 1:nmax
        fprintf(fid, '%i ', S(n,1:mmax-1));
        fprintf(fid, '%i\n', S(n,mmax));
    end
end

for t = 401:800
    if (t>1)
        P = circshift(P,[0 1]);
        Qaddit = circshift(Qaddit,[0 2]); %Schuif additioneel drukveld een
roostercel door...
        Q = circshift(Q+Qaddit,[0 2]); %Schuif drukveld een roostercel door...
        S = P + Q;
    end
    fprintf(fid, 'TIME = %0.5f minutes since 2009-11-05 00:00:00 +00:00\n', (t-
1.00)*tijdstap);
    for n = 1:nmax
        fprintf(fid, '%i ', WEW(n,1:mmax-1));
        fprintf(fid, '%i\n', WEW(n,mmax));
    end
    for n = 1:nmax
        fprintf(fid, '%i ', WNS(n,1:mmax-1));
        fprintf(fid, '%i\n', WNS(n,mmax));
    end
    for n = 1:nmax
        fprintf(fid, '%i ', S(n,1:mmax-1));
        fprintf(fid, '%i\n', S(n,mmax));
    end
end

```

```
    end

end

for t = 801:stappen+1;
    if (t>1)
        P = circshift(P,[0 1]);
        Q = circshift(Q,[0 2]);
        S = P+Q;
    end
    fprintf(fid,'TIME = %0.5f minutes since 2009-11-05 00:00:00 +00:00\n',(t-
1.00)*tijdstap);
    for n = 1:nmax
        fprintf(fid,'%i ',WEW(n,1:mmax-1));
        fprintf(fid,'%i\n',WEW(n,mmax));
    end
    for n = 1:nmax
        fprintf(fid,'%i ',WNS(n,1:mmax-1));
        fprintf(fid,'%i\n',WNS(n,mmax));
    end
    for n = 1:nmax
        fprintf(fid,'%i ',S(n,1:mmax-1));
        fprintf(fid,'%i\n',S(n,mmax));
    end
end
fclose(fid);
```

Bijlage 8

In deze bijlage zijn twee tabellen opgenomen om vanuit een ander invalshoek een mult criteria-analyse te doen. Gekozen is om vanuit het standpunt van de beheerder en vanuit het standpunt van de gebruikers een multicriteria tabel op te zetten. In de twee verschillende analyses wordt de weging veranderd. De scores per variant zullen daardoor niet veranderen en blijven gelijk dit is verder ook beschreven in hoofdstuk vier en zal hier verder niet meer toegelicht worden.

Beheerder

Vanuit de visie van de beheerder zijn belangrijke onderwerpen:

- Stabiele oevers / onderhoud;
- Duurzaamheid;
- Benodigde ruimte;
- Veiligheid.

De andere punten zijn voor de beheerder van ondergeschikt belang en zullen daardoor een lagere weging krijgen.

Criteria	weging (w)	variant 1 score (s) (w x s)		variant 2 score (s) (w x s)		variant 3 score (s) (w x s)	
Natte doorsnede van het kanaal A _c	1	1	1	1	1	3	3
Uitdemping golven	1	1	1	3	3	3	3
Mogelijkheid tot aanleg natuurvriendelijke oevers	1	1	1	3	3	3	3
Stabiele oevers/onderhoud	3	1	3	1	3	3	9
Duurzaamheid	3	1	3	1	3	3	9
Benodigde ruimte (aanleg)	3	2	6	1	3	1	3
Landschap	1	1	1	2	2	2	2
Veiligheid	3	1	3	1	3	3	9
Relatie met het water	1	1	1	3	3	3	3
Totaal		10	20	16	24	22	44
Procentueel (max punten 51=100%)			39%		47%		86%
<u>Weging</u> 1= Neutraal 2 = Belangrijk 3 = Zeer Belangrijk		<u>Score</u> 1 = Ongunstig 2 = Gunstig 3 = Zeer gunstig					

In de tabel is te zien dat voor de beheerder variant (3) het beste alternatief is, dit alternatief scoort goed op de punten die de beheerder belangrijk vindt. De varianten (1) en (2) scoren bijna gelijk

Gebruikers

Het kanaal kent vele gebruikers, hierbij wordt als eerste gedacht aan de scheepvaart. Zowel de recreatievaart en de beroepsvaart maken gebruik van het kanaal. Verder zijn veel verschillende gebruikers van het kanaal te vinden op de oevers van het kanaal. Deze gebruikers profiteren van de maatschappelijke waarden die het kanaal te bieden heeft, zo kunnen sportvissers gebruik maken van de oever om zo een hengel uit te gooien. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de inrichting van de oevers een maatschappelijk belang is, hierbij dient rekening gehouden te worden met de invulling van de oever.

De belangrijkste punten voor de gebruikers zijn:

- Uitdemping golven (scheepvaart);
- Mogelijkheid tot aanleg natuurvriendelijke oevers (maatschappelijk);
- Landschap (maatschappelijk);
- Relatie met het water (recreanten).

Criteria	weging (w)	variant 1 score (s)		variant 2 score (s)		variant 3 score (s)	
		(w x s)	(w x s)	(w x s)	(w x s)	(w x s)	(w x s)
Natte doorsnede van het kanaal A _c	2	1	2	1	2	3	6
Uitdemping golven	3	1	3	3	9	3	9
Mogelijkheid tot aanleg natuurvriendelijke oevers	3	1	3	3	9	3	9
Stabiele oevers/Onderhoud	1	1	1	1	1	3	3
Duurzaamheid	1	1	1	1	1	3	3
Benodigde ruimte (aanleg)	1	2	2	1	1	1	1
Landschap	3	1	3	2	6	2	6
Veiligheid	1	1	1	2	2	3	3
Relatie met het water	3	1	3	3	9	3	9
Totaal		10	19	16	40	22	49
Procentueel (max. punten 53=100%)			36%		76%		92%
<u>Weging</u> 1 = Neutraal 2 = Belangrijk 3 = Zeer Belangrijk		<u>Score</u> 1 = Ongunstig 2 = Gunstig 3 = Zeer gunstig					

Met de weegfactoren aangepast voor de gebruikers van het kanaal is te zien dat voor deze situatie de varianten 2 en 3 dichter bij elkaar liggen dan in de andere multicriteria-analyses.

Conclusie

In alle varianten scoort variant 1 het laagst en variant 3 het hoogst. Variant 2 scoort bij de gebruikers ook hoog, maar in de analyse bij de beheerder krijgt deze variant een lagere score. Variant 3 scoort in alle gevallen het best, hierbij maakt het niet uit of er een weging toegepast is.