

Opdrachtgever: Rijkswaterstaat WINN



# Reductie sedimentatie in havens

## Verdiepingsslag: Ontwerp van maatregelen



Auteurs: P. Termes  
H. Talstra  
H. Winterwerp





## Samenvatting

In de Nederlandse waterlopen, die in beheer zijn bij Rijkswaterstaat, wordt een deel van het door rivieren en zee aangevoerde zand en slib afgezet, jaarlijks ongeveer 9 miljoen m<sup>3</sup>. Het verwijderen, transporteren en bergen van deze jaarlijkse hoeveelheid kost circa € 120 miljoen. Een groot deel van deze kosten komt voort uit het nautisch baggeren in de mondingen van rivierhavens en kanalen en komt ten laste van Rijkswaterstaat, een ander deel is voor rekening van de havenbedrijven.

In 2006 en 2007 is een verkennend onderzoek uitgevoerd in het kader van WINN om een beeld te krijgen waar, binnen het Nederlandse beheersgebied van de Rijn en de Maas, de beste kansen liggen om een aanslibbingreducerende maatregel toe te passen, teneinde de kosten voor baggeronderhoud in havens duurzaam te beperken. Rijkswaterstaat heeft bewust gekozen voor een pragmatische aanpak welke moet leiden tot een werkelijke toepassing van een praktische, relatief eenvoudige en daarmee goedkope uitvoering van een maatregel in een pilotproject binnen het eigen beheersgebied. In het verkennend onderzoek zijn de volgende havens langs de Bergsche Maas, de Waal en de Maas geselecteerd:

- de industriehaven bij de Amercentrale langs de Bergsche Maas,
- de overnachtingshaven bij Haaften langs de Waal en
- de jachthaven La Bonne Aventura bij Roermond langs de Maas.

In de verdiepingsslag, die in 2007 en 2008 is uitgevoerd, is per haven een drietal veelbelovende maatregelen ontworpen die kunnen leiden tot een reductie van de sedimentatie in de havens zonder overlast voor de scheepvaart te veroorzaken. Tijdens de verdiepingsslag bleek dat de eerder geselecteerde jachthaven bij Roermond langs de Maas al in een ander kader wordt aangepast door de gemeente Roermond. Deze haven is in dit onderzoek verder buiten beschouwing gelaten, afgezien van het monitoringplan dat voor de jachthaven bij Roermond is opgezet evenals de monitoringplannen voor de havens bij de Amercentrale en bij Haaften. Voor de volgende havens zijn geschikte maatregelen geselecteerd en ontworpen:

- de industriehaven bij de Amercentrale langs de Bergsche Maas,
- de overnachtingshaven bij Haaften langs de Waal.

De Amerhaven is bijzonder aangezien een groot deel van het jaar koelwater via de haven wordt ingelaten ten behoeve van de energiecentrale.

De maatregelen om sedimentatie van zand en slib in een haven te reduceren, zijn in de verkenning in 2007 geïnventariseerd. In de verdiepingsslag zijn maatregelen uit die inventarisatie opnieuw beoordeeld en zijn twee extra maatregelen toegevoegd; een hoogwatergeul door de Nieuwe Dombosch en zandspiraalbuizen. Het effect van de hoogwatergeul is met FINEL2D berekend. Voor de zandspiraalbuis en de doorlatende kribben zijn ontwerpregels opgesteld. De analyse van de hydraulische en bodemgegevens rond de havens heeft geleid tot drie geschikte maatregelen per haven, waarvoor een ontwerp is gemaakt. De maatregelen zijn voor,

- de industriehaven Amercentrale:
  - versmalling haveningang en doorlatende kribben,
  - nevengeul door de Nieuwe Dombosch,
  - zandspiraalbuizen,
- de overnachtingshaven Haaften:
  - aanpassing oeverlijn en doorlatende kribben,

- versmalling haveningang,
- zandspiraalbuizen.

Ten einde inzicht te verkrijgen in het stromingspatroon en het gedrag van de sedimentatie in de Amerhaven, is een FINEL2D stromingsmodel gebouwd. De huidige situatie en de situatie met een versmalling van de haveningang en een nevengeul door de Nieuwe Dombosch zijn doorgerekend. Uit de berekeningsresultaten volgde dat de inname van sediment met name wordt 'gestuurd' door de inname van 30 m<sup>3</sup>/s koelwater via de haven. Met het reduceren van de sedimentvracht van het water voor de haveningang, reduceert automatisch de sedimentvracht die met het water de haven instroomt. De berekeningen duiden op een reductie van de slibvracht van 10 à 20% in de havenmond en in de haven. Hoeveel het transport van grover bodemmateriaal reduceert door de maatregelen, is vooralsnog niet met dit numerieke model te bevestigen. Daarvoor zouden schaalmodelproeven moeten worden uitgevoerd waarmee de modelparameters zouden kunnen worden afgeregeld om meer betrouwbare rekenresultaten te verkrijgen.

Het aanleggen van doorlatende kribben of zandspiraalbuizen zou de aanvoer van bodemmateriaal voor de havenmond moeten reduceren en daarmee de sedimentatie. Het effect van beide maatregelen kan niet met een twee-dimensionaal hydraulisch-morfologisch rekenmodel worden bepaald aangezien de maatregelen een drie-dimensionaal snelheidsveld opwekken. Dit vereist onderzoek in een gedetailleerd drie-dimensionaal rekenmodel of schaalmodelonderzoek. Beide maatregelen zijn voor de twee havens ontworpen met de opgestelde ontwerpregels en het effect is geschat op basis van expert judgement. Alle drie de maatregelen voor de overnachtingshaven bij Haaften zijn ontworpen met rekenregels en op basis van expert judgement.

Een globale kosten-batenanalyse is uitgevoerd voor alle maatregelen en voor beide havens. Daaruit blijkt, gegeven de beschikbare informatie, dat voor de Amerhaven de versmalling van de haveningang in combinatie met doorlatende kribben de hoogste netto-contante waarde oplevert. Voor de haven bij Haaften is de versmalling van de haveningang de maatregel die de hoogste netto-contante waarde oplevert. Nader onderzoek bij de belanghebbende partijen moet echter uitwijzen of andere argumenten, criteria en belangen niet een groter gewicht hebben bij de keuze voor een maatregel.

De aanbevelingen voor de opzet van een pilot-project waarin een maatregel werkelijk wordt uitgevoerd en het effect ervan onderzocht is, dat zo spoedig mogelijk zou moeten worden aangevangen met het vastleggen van de huidige situatie, zoals beschreven in de monitoringplannen. Vervolgens kan het ontwerp van een gekozen maatregel per haven worden uitgewerkt, eventueel ondersteund met berekeningen, en besteksklaar worden gemaakt. Na de uitvoering van de maatregel moet de hydraulische en morfologische situatie rond de havens worden gemonitord zoals beschreven in de opgestelde monitoringplannen.

# Inhoud

<b>Lijst van tabellen .....</b>	<b>v</b>
<b>Lijst van figuren .....</b>	<b>vii</b>
<b>1 Inleiding .....</b>	<b>1</b>
1.1 Aanleiding .....	1
1.2 Doelstelling .....	1
1.3 Onderzoeksaanpak .....	2
1.4 Parallel schaalmodelonderzoek .....	2
<b>2 Havenselectie .....</b>	<b>5</b>
2.1 Selectiecriteria .....	5
2.2 Havenkeuze .....	5
<b>3 Gegevensanalyse .....</b>	<b>9</b>
3.1 Inleiding .....	9
3.2 Gegevens industriehaven Amercentrale .....	9
3.3 Gegevens overnachtingshaven Haaften .....	15
<b>4 Selectie maatregelen .....</b>	<b>19</b>
4.1 Algemeen .....	19
4.2 Industriehaven Amercentrale .....	20
4.3 Overnachtingshaven Haaften .....	25
<b>5 Berekeningen Amerhaven .....</b>	<b>31</b>
5.1 Inleiding .....	31
5.2 Achtergronden van FINEL2D .....	31
5.3 Modelopzet, invoer en randvoorwaarden .....	32
5.4 Overzicht van de gesimuleerde gevallen .....	34
5.5 Resultaten voor de nulsituatie (gevallen 01-06) .....	35
5.6 Conclusies op basis van de nulsituatie; oplossingsrichtingen .....	41
5.7 Resultaten voor ingreep #1 (gevallen 11-16) .....	43
5.8 Resultaten voor ingreep #2 (gevallen 21-26) .....	46
5.9 Resultaten voor ingrepen #1 en #2 gecombineerd (gevallen 31-36) .....	49
5.10 Algemene conclusies en aanbevelingen berekeningen .....	52
<b>6 Keuze en uitwerking maatregelen .....</b>	<b>55</b>
6.1 Algemeen .....	55
6.2 Maatregelen industriehaven Amercentrale .....	55
6.2.1 Onderbouwing keuze .....	55
6.2.2 Uitwerking versmallen haveningang en doorlatende kribben .....	56
6.2.3 Uitwerking hoogwatergeul .....	57
6.2.4 Uitwerking zandspiraalbuizen .....	58
6.3 Maatregelen overnachtingshaven Haaften .....	61
6.3.1 Onderbouwing keuze .....	61
6.3.2 Uitwerking aanpassen haveningang en doorlatende kribben .....	61

6.3.3	Uitwerking versmallen haveningang .....	63
6.3.4	Uitwerking zandspiraalbuizen.....	64
<b>7</b>	<b>Kosten-batenanalyse .....</b>	<b>67</b>
7.1	Inleiding.....	67
7.2	Gegevens kosten en baten .....	67
7.2.1	Kosten maatregelen industriehaven Amercentrale .....	67
7.2.2	Baten Amerhaven door reductie baggerwerk .....	68
7.2.3	Kosten maatregelen overnachtingshaven Haaften .....	69
7.2.4	Baten Haaften door reductie baggerwerk .....	69
7.3	Rekenmethode kosten-batenanalyse.....	70
7.4	Kosten-baten industriehaven Amercentrale.....	71
7.5	Kosten-baten overnachtingshaven Haaften .....	72
<b>8</b>	<b>Monitoring .....</b>	<b>73</b>
8.1	Algemeen.....	73
8.2	Metingen .....	73
8.3	Meetgebied.....	74
8.4	Meetfrequentie.....	74
8.5	Monsteranalyse .....	75
8.6	Meetapparatuur .....	75
8.7	Analyse meetgegevens .....	75
<b>9</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen.....</b>	<b>77</b>
9.1	Conclusies .....	77
9.2	Aanbevelingen .....	78
<b>10</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>79</b>
	<b>Bijlage A: Beschikbare gegevens .....</b>	<b>83</b>
	<b>Bijlage B: Monitoringplan Amerhaven.....</b>	<b>105</b>
	<b>Bijlage C: Monitoringplan haven Haaften.....</b>	<b>109</b>
	<b>Bijlage D: Monitoringplan haven Roermond.....</b>	<b>113</b>
	<b>Bijlage E: Ontwerp doorlatende kribben .....</b>	<b>119</b>
	<b>Bijlage F: Ontwerp zandspiraalbuizen .....</b>	<b>123</b>
	<b>Bijlage G: Verslag schaalmodelproeven .....</b>	<b>131</b>

## Lijst van tabellen

Tabel 4-1	Overzicht geïnventariseerde maatregelen met verwachte effecten.....	19
Tabel 7-1	Netto contante waarde drie maatregelen Amerhaven bij 7.000 m <sup>3</sup> /jaar baggeren als functie van de reductie van het baggervolume .....	71
Tabel 7-2	Netto contante waarde drie maatregelen overnachtingshaven Haaften bij 2.000 m <sup>3</sup> /jaar baggeren als functie van de reductie van het baggervolume.....	72
Tabel A-1	Grootschalige bodemwijziging in Bergsche Maas voor de haven Amercentrale, 1970-1996 .....	91
Tabel A-2	Overzicht D10 en D50 bodemmonsters op 11 locaties voor de haveningang Amercentrale.....	94
Tabel D-1	Kostenschatting (excl. BTW) vaste meetopstelling voor twee OBS-en en twee druksensoren, op dezelfde locatie en hetzelfde tijdstip geplaatst (exclusief rapportage).....	117
Tabel D-2	Kosten (excl. BTW) SiltProfiler en ADCP echo intensiteit (uitgaande van gebruik ADCP RWS)....	117
Tabel G-1	Waardering opstellingen bij verschillende locaties palenrij .....	135
Tabel G-2	Waardering opstellingen bij verschillend aantal palen in palenrij .....	136





## Lijst van figuren

Figuur 2-1	Industriehaven Amercentrale langs de Bergsche Maas nabij km 251.....	6
Figuur 2-2	Overnachtingshaven Haaften langs de Waal nabij km 936 .....	6
Figuur 3-1	Overzicht industriehaven bij Amercentrale met koelwaterinlaten en -uitlaat.....	10
Figuur 3-2	Bodempeiling industriehaven Amercentrale, april 2005 .....	11
Figuur 3-3	Bodempeiling 2006 in havenmond met indicatie waterdiepte t.o.v. NAP.....	12
Figuur 3-4	Bodemniveau in de Nieuwe Dombosch .....	13
Figuur 3-5	Baggerhoeveelheden per locaties rond de haveningang van de Amerhaven in 2002.....	14
Figuur 3-6	Overzicht overnachtingshaven Haaften aan de Waal, km 936 .....	15
Figuur 3-7	Een van de voorgestelde oplossingsrichtingen voor Haaften, uit Grontmij (2007) .....	16
Figuur 3-8	Eigendomsgrens overnachtingshaven Haaften langs de Waal.....	16
Figuur 4-1	Principe van versmallen haveningang industriehaven Amercentrale .....	20
Figuur 4-2	Foto haveningang rivier vanaf loswal langs Bergsche Maas in oostelijke richting genomen.....	21
Figuur 4-3	Schets van drempel met scherm bovenstrooms van ingang industriehaven Amercentrale.....	22
Figuur 4-4	Principe drempel met scherm bovenstrooms van ingang industriehaven Amercentrale .....	22
Figuur 4-5	Principe van doorlatende constructies bovenstrooms haveningang industriehaven Amercentrale.....	23
Figuur 4-6	Aanleg nevengeul.....	23
Figuur 4-7	Aanleg zandspiraalbuizen .....	24
Figuur 4-8	Principe werking van een zandspiraalbuis.....	25
Figuur 4-9	Principe doorlatende kribben bovenstrooms haveningang overnachtingshaven Haaften .....	26
Figuur 4-10	Principe versmallen haveningang overnachtingshaven Haaften .....	27
Figuur 4-11	Principe haveningang met drempels en parallel scherm overnachtingshaven Haaften.....	28
Figuur 4-12	Schets van drempels met scherm bovenstrooms van ingang overnachtingshaven Haaften.....	28
Figuur 4-13	Aanleg zandspiraalbuizen voor de overnachtingshaven Haaften .....	29
Figuur 4-14	Principe werking van een zandspiraalbuis.....	29
Figuur 5-1	Het FINEL rekengebied, begrensd door de witte lijn, omgeving en niveau m t.o.v. NAP.....	32
Figuur 5-2	Rekenrooster voor FINEL2D van Bergsche Maas, Donge en Amerhaven .....	33
Figuur 5-3	Berekende stroomsnelheden [m/s] met FINEL2D .....	37
Figuur 5-4	Bodemniveau [m+NAP] en stroomsnelheidsvectoren in en rondom de havenmond.....	38
Figuur 5-5	Berekende slibconcentraties [kg/m <sup>3</sup> ] .....	39
Figuur 5-6	Berekend initieel slibbezinkingspatroon na 50 uur [laagdikte in m].....	40
Figuur 5-7	De twee voorgestelde ingrepen in de geometrie.....	42
Figuur 5-8	Verschillen tussen geval 03 en geval 13 (ingreep #1): stroomsnelheid, slibconcentratie en sliblaagdikte .....	44
Figuur 5-9	Verschillen tussen geval 06 en geval 16 (ingreep #1): stroomsnelheid, slibconcentratie en sliblaagdikte .....	45
Figuur 5-10	Verschillen tussen geval 03 en geval 23 (ingreep #2): stroomsnelheid, slibconcentratie en sliblaagdikte .....	47
Figuur 5-11	Verschillen tussen geval 06 en geval 26 (ingreep #2): stroomsnelheid, slibconcentratie en sliblaagdikte .....	48
Figuur 5-12	Verschillen tussen geval 03 en geval 33 (ingreep #1 en #2 gecombineerd): stroomsnelheid, slibconcentratie en sliblaagdikte.....	50
Figuur 5-13	Verschillen tussen geval 06 en geval 36 (ingreep #1 en #2 gecombineerd): stroomsnelheid, slibconcentratie en sliblaagdikte.....	51
Figuur 6-1	Havenversmalling en doorlatende kribben .....	56
Figuur 6-2	Principe doorlatende krib voor de Amerhaven .....	56

Figuur 6-3	Bodemligging nevengeul door buitendijksgebied de Nieuwe Dombosch .....	57
Figuur 6-4	Stromingspatronen in de havenmondning met en zonder koelwaterinname.....	58
Figuur 6-5	Locatie zandspiraalbuizen bij Amerhaven .....	59
Figuur 6-6	Afstand tussen wanden van zandspiraalbuis bij Amerhaven .....	60
Figuur 6-7	Havenversmalling met doorlatende kribben .....	62
Figuur 6-8	Principe doorlatende krib in de vorm van een palenrij.....	63
Figuur 6-9	Versmallen haveningang met parallel geplaatste doorlatende constructie .....	64
Figuur 6-10	Locatie zandspiraalbuizen bij haven Haaften.....	65
Figuur 6-11	Afstand tussen wanden van zandspiraalbuis bij haven Haaften .....	66
Figuur 6-12	Schets van zandspiraalbuis opgebouwd uit breukstenen dammen .....	66
Figuur 8-1	Principe meetgebied rond een haven en raaien t.b.v. snelheidsmetingen .....	74
Figuur A-1	Overzicht industriehaven bij Amercentrale met koelwaterinlaten en -uitlaat .....	84
Figuur A-2	Lossen van schepen langs de loswallen.....	85
Figuur A-3	Koelwaterinname van de eenheden 8 en 9 van de Amercentrale in 2006.....	85
Figuur A-4	Jachthaven en koelwaterinlaat in haven.....	86
Figuur A-5	Overzicht van de locaties van de Amercentrale en Dongecentrale.....	87
Figuur A-6	Frequentieverdeling waterstand in de Bergsche Maas bij Keizersveer.....	88
Figuur A-7	Bodemligging uit peiling maart 2000 .....	88
Figuur A-8	Frequentieverdeling afvoer in de Bergsche Maas bij Keizersveer .....	89
Figuur A-9	Gebied waarin 2007 is gebaggerd in de Bergsche Maas.....	89
Figuur A-10	Bodempeiling industriehaven Amercentrale, april 2005 .....	90
Figuur A-11	Bodempeiling in havenmondning, 2002 .....	91
Figuur A-12	Bodempeiling in havenmondning, 2005 .....	92
Figuur A-13	Bodempeiling in havenmondning, 2006 .....	92
Figuur A-14	Bodemniveau in de Nieuwe Dombosch.....	93
Figuur A-15	Locaties bodemmonsters in de Bergsche Maas en Donge voor de haveningang Amercentrale ...	93
Figuur A-16	Zeefkromme bodemmateriaal in de Dongemonding.....	94
Figuur A-17	Zeefkromme bodemmateriaal in de Bergsche Maas .....	94
Figuur A-19	Baggerlocaties in 2002 .....	95
Figuur A-20	Hoeveelheden vervuilde baggerspecie rond de haven Amercentrale.....	95
Figuur A-21	Aandeel zand langs de Bergsche Maas en Amer .....	96
Figuur A-22	Aandeel slib langs de Bergsche Maas en Amer .....	97
Figuur A-23	Aandeel organische stoffen langs de Bergsche Maas en Amer .....	97
Figuur A-24	Concentratie zwevend materiaal bij Keizersveer 1965-2006 .....	98
Figuur A-25	Overschrijding maandgemiddelde slibconcentratie in de Bergsche Maas bij Keizerveer.....	99
Figuur A-26	Overzicht overnachtingshaven Haaften aan de Waal, km 936 .....	100
Figuur A-27	Een van de voorgestelde oplossingsrichtingen voor Haaften, uit Grontmij (2007) .....	101
Figuur A-28	Stroomvoerend regime langs de Waal nabij Haaften volgens de BGR 2006.....	102
Figuur A-29	Eigendomsgrens overnachtingshaven Haaften langs de Waal.....	102
Figuur A-30	Bodempeiling in monding overnachtingshaven Haaften, jul 2004, aug 2005, mrt 2007 .....	103
Figuur A-31	Locaties bodemmonstername in 2000 en 2002 invaart overnachtingshaven Haaften .....	104
Figuur B-1	Definitie meetgebied voor het monitoren van de bodem in de Bergsche Maas en Amerhaven ...	106
Figuur B-2	Definitie meetgebied voor het meten van stroomsnelheden in de Bergsche Maas en Amerhaven .....	106
Figuur C-1	Definitie meetgebied voor het monitoren van de bodem in de Bergsche Maas en Amerhaven ...	110
Figuur C-2	Definitie meetgebied voor het meten van stroomsnelheden in de Bergsche Maas en Amerhaven .....	110
Figuur D-1	Overzichtsbeeld van jachthavens 't Steel en La Bonne Aventure, de Maas nabij Roermond.....	113
Figuur D-2	Geschematiseerde circulatiecellen in de haven van Roermond (op basis van Van Schijndel en Kranenburg, 1997).....	114

Figuur D-3	Monitoringsgebied rond de haven van Roermond .....	115
Figuur E-1	Definities stromingsrichtingen en afmetingen doorlatende krib.....	119
Figuur E-2	Gevoeligheid snelheidsreductie voor grootte stromingsblokkering en stromingshoek.....	120
Figuur E-3	Verloop stromingsblokkering (boven) en definitie kriblengte en kribafstand (beneden).....	121
Figuur F-1	Principe werking van een bodemscherm.....	123
Figuur F-2	Principe werking van een zandspiraalbuis.....	123
Figuur F-3	Voorbeeld van verloop van schermen van een zandspiraalbuis.....	124
Figuur F-4	Definities debiet door zandspiraalbuis .....	124
Figuur F-5	Performance ratio voor $\beta = 0,1$ t/m $\beta = 0,35$ .....	126
Figuur F-6	Afhankelijkheid ontwerp stroomsnelheid voor korreldiameter, waterdiepte en korrelruwheid.....	128
Figuur F-7	Aanpassingslengte voor sedimenttransport na verstoring van het evenwichtstransport .....	129
Figuur G-1	Geometrie van het schaalmodel .....	131
Figuur G-2	Details van de taluds en palenrij toegepast in het schaalmodel .....	132
Figuur G-3	Opstelling meetapparatuur in en boven het schaalmodel .....	132
Figuur G-4	Meetlocaties in het schaalmodel .....	134
Figuur G-5	Resultaten x- en y-stroomsnelheden bij verschillende locaties palenrij.....	135
Figuur G-6	Resultaten x- en y-stroomsnelheden bij verschillend aantal palen in palenrij .....	135
Figuur G-7	Voorbeeld drijfvermetingen in het schaalmodel .....	136
Figuur G-8	Bodemligging (boven) en diepte-gemiddelde snelheid in rivier en haven .....	137

Bron: De luchtfoto's opgenomen in dit rapport zijn betrokken van Google Maps.



# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

In 2006 is het project 'Reductie sedimentatie in havens – Onderzoek naar kansrijke oplossingen' gestart vanuit het WINN-programma van Rijkswaterstaat. Dit project, met een verkennend karakter, is in april 2007 afgerond (Barneveld et al., 2007). In deze verkenning zijn maatregelen geselecteerd waarmee de sedimentatie van zand en slib in rivierhavens zou kunnen worden gereduceerd. Een significante reductie van de sedimentatie in een haven houdt direct in dat de baggerinspanning reduceert en daarmee de kosten voor het baggeronderhoud jaarlijks worden beperkt. Een van de doelen van het project was dat een maatregel na een beperkt ontwerptraject in situ wordt uitgevoerd als een 'pilotproject'. Door de hydraulische en morfologische ontwikkelingen intensief te monitoren, kan er veel worden geleerd van het effect van een maatregel in de praktijk.

In het verkennend onderzoek zijn drie rivierhavens in het beheersgebied van de Rijn en de Maas geselecteerd die geschikt lijken voor een pilotproject. De keuze van de havens is onder andere gebaseerd op de aanwezige problemen met sedimentatie in en rond de havens, de beschikbaarheid van meetgegevens en de wil van de beheerder om het sedimentatieprobleem op te lossen. In de verkenning zijn de volgende drie havens geselecteerd:

- de industriehaven bij de Amercentrale langs de Bergsche Maas, waarvoor tevens een voorontwerp is gemaakt van een maatregel,
- de overnachtingshaven bij Haaften langs de Waal en
- de jachthaven bij Roermond langs de Maas.

Maatregelen voor deze havens worden in principe in de verdiepingsslag verder uitgewerkt. Van de haven van Haaften waren, tijdens de verkenning, onvoldoende gegevens voorhanden om een ontwerp te maken. In een laat stadium van de verkenning bleek dat de haven bij Roermond al in een ander kader wordt aangepast door de gemeente Roermond.

In de voorliggende rapportage van de verdiepingsslag zijn drie maatregelen ontworpen voor de industriehaven van de Amercentrale en voor de overnachtingshaven Haaften. Het ontwerp van de maatregelen is zo, dat met een globale kosten-batenanalyse een keuze kan worden gemaakt uit de maatregelen. De gekozen maatregel per haven kan vervolgens 'besteksklaar' worden gemaakt alvorens te worden geïmplementeerd. Als de maatregelen in de praktijk blijken te werken, kunnen zij als voorbeeld dienen voor andere en grotere havens die eveneens met sedimentatieproblematiek te maken hebben. Tevens is een monitoringplan opgesteld om de bodemontwikkelingen en het stroombeeld in en rond de havens te volgen in de tijd, zodat met de resultaten het effect kan worden gekwantificeerd.

## 1.2 Doelstelling

De verdiepingsslag heeft als doel de maatregelen, die de sedimentatie in een haven kunnen reduceren, voor de geselecteerde havens in meer detail uit te werken. Met het resultaat kan een keuze worden gemaakt voor één uit te voeren maatregel per haven waarvan de werking vervolgens in een pilotproject kan worden onderzocht.

## 1.3 Onderzoeksaanpak

Het onderzoek is in vier onderdelen gesplitst:

1. Inventarisatie.  
In een korte her-inventarisatie is onderzocht of er meer geschikte havens zijn voor het uitvoeren van een pilotproject.
2. Havenselectie en maatregelselectie.  
In een overleg met deskundigen is een keuze gemaakt welke havens in het onderzoek worden betrokken.
3. Havenontwerp.  
Van de geselecteerde havens is een ontwerp van de maatregel gemaakt. Het effect van de maatregel is op basis van expert judgement geschat, onderbouwd door de berekeningsresultaten van een 2D numeriek model (FINEL) en met proeven in een schaalmodel.
4. Monitoringplannen.  
Een monitoringplan is opgesteld voor de jachthaven van Roermond. Tevens is een monitoringplan opgesteld voor de geselecteerde havens.

Het onderzoek is uitgevoerd door:

- HKV [LIJN IN WATER](#), projectleiding, keuze en ontwerp van maatregelen, analyse berekeningsresultaten, uitwerken maatregel tot ontwerp en uitwerken monitoringplan voor de industriehaven Amercentrale en de overnachtingshaven Haaften.
- Svašek, uitvoeren berekeningen met FINEL en analyse van de resultaten.
- Deltares, voorheen WL | Delft Hydraulics, advies bij het ontwerp van de maatregelen en analyse van de berekeningsresultaten, alsmede uitwerken van het monitoringplan voor de haven van Roermond.
- Struiksma River Engineering, advies bij de selectie en het ontwerp van de maatregelen.

Het projectteam bestond uit de volgende personen:

- Marcel Bruggers (Deltares voorheen Rijkswaterstaat RIZA) onderhield als opdrachtgever de contacten met de Meetdiensten, regionale Rijkswaterstaatsdiensten en Essent.
- Simone van Schijndel (Deltares) heeft bijgedragen aan de discussie over de haven- en maatregelkeuze.
- Nico Struiksma (SRE) heeft bijgedragen aan de discussie over de te verwachten effecten van de verschillende maatregelen.
- Harmen Talstra (Svašek) heeft de FINEL-berekeningen voor de industriehaven van de Amercentrale uitgevoerd en geanalyseerd. Harmen verving Bram van Prooijen die per december 2007 bij de TUD werkzaam is.
- Paul Termes (HKV) was de projectleider.
- Maarten van der Wal (Deltares) heeft kennis bijgedragen over doorlaatbare constructies en zandspiraalbuizen.
- Han Winterwerp (Deltares) schreef het monitoringplan voor de haven van Roermond.

## 1.4 Parallel schaalmodelonderzoek

Parallel aan het onderzoek in de verdiepingsslag is bij het Vloeistoflaboratorium van de TU Delft onderzoek in een schaalmodel uitgevoerd. Het betreft een schaalmodel van een haven aan een rivier waarin het effect van een palenrij bovenstrooms van de haveningang op het stroombeeld is onderzocht. In het schaalmodel is het effect van de palenrij op de stroomsnelheden en

grootte van de neerstroming onderzocht voor een situatie met en zonder koelwaterinname via de haven. Het onderzoek is uitgevoerd door een afstudeerder die is bijgestaan door twee stagiaires van de Hogeschool Utrecht Civiele Techniek. Het rapport van het schaalmodelonderzoek verschijnt in juni 2008, de stageverslagen van beide stagiaires zijn samen met het voorliggende rapport opgeleverd aan de opdrachtgever.

In Bijlage G is een verslag opgenomen van de schaalmodelproeven waarin een korte analyse is gegeven van de eerste modelresultaten en resultaten van numeriek simulaties met FINLAB van een stromingssituatie in het schaalmodel.





## 2 Havenselectie

### 2.1 Selectiecriteria

Tussen juli 2006 en april 2007 is een verkennend onderzoek (Barneveld et al., 2007) uitgevoerd waarin geschikte havens en maatregelen zijn geselecteerd. Aan het eind van die verkenning was er alleen zekerheid over de keuze van de industriehaven Amercentrale. Door het ontbreken van gegevens van de overnachtingshaven Haaften dreigde die haven niet geschikt te zijn voor verder onderzoek. Verder bleek medio 2007 dat de jachthaven bij Roermond op korte termijn door de gemeente zou worden aangepast. Bij de start van de verdiepingsslag (in september 2007) moesten dus twee nieuwe havens worden geselecteerd. Daarvoor zijn de selectiecriteria uit de verkenning gehanteerd:

- De haven moet een nautisch, hydraulisch of morfologisch probleem hebben.
- De baggerhoeveelheden per jaar moeten (globaal) bekend zijn. Hoe groter de aanslibbing per jaar hoe geschikter de haven is voor een ingreep, mits de aanslibbing voor de scheepvaart een probleem is.
- De haven moet in een rivierafvoer gedomineerd traject liggen langs de Rijntakken, de Maas of in de Rijn-Maasmonding.
- De haven moet bij voorkeur in beheer zijn bij Rijkswaterstaat.
- Toekomstige plannen voor het aanpassen van de haven, aansluitende oevers of riviertraject kunnen met een ingreep worden gecombineerd.
- Er moet zicht zijn op een relatief eenvoudige oplossing van het probleem door middel van het pilotproject. Bovendien moet de uitvoering van de aanpassing niet te veel hinder voor de scheepvaart opleveren.
- Er moet draagvlak zijn bij de rivierbeheerder en/of de havenbeheerder voor een pilotproject.

### 2.2 Havenkeuze

Uit een korte inventarisatie van de beschikbare gegevens uit de verkenning bleek dat er geen havens waren die aan alle criteria voldeden, zoals in de verkenning al was geconstateerd. Wel waren er meer gegevens beschikbaar van de overnachtingshaven Haaften en is in 2007 een plan ontwikkeld voor de aanpassing van de ingang en inrichting van die haven. Alles overwegend is tijdens het startoverleg gekozen voor de volgende twee havens, in plaats van drie, die beide aan de criteria voldoen en waarvoor maatregelen worden uitgewerkt:

- de industriehaven Amercentrale langs de Bergsche Maas nabij km 251, zie Figuur 2-1,
- de overnachtingshaven Haaften langs de Waal nabij km 936, zie Figuur 2-2.

De belangrijkste redenen voor de keuze van slechts twee havens zijn ingegeven door de beschikbaarheid van gegevens en de wens om de sedimentatie in de industriehaven Amercentrale te reduceren en de voorgenomen aanpassing van de overnachtingshaven Haaften. Uit de havenselectie die in de verkennende studie is uitgevoerd (Barneveld et al., 2007) volgde dat er weinig andere geschikte havens zijn waarvan gegevens beschikbaar zijn en waar sedimentatie een (groot) probleem is. Voor de meeste rivierhavens geldt dat er aanzanding en aanslibbing is, maar die wordt met het reguliere onderhoud iedere circa vijf jaar verwijderd. In de tussengelegen periode leidt de sedimentatie niet tot grote problemen voor de scheepvaart.



Figuur 2-1 Industriehaven Amercentrale langs de Bergsche Maas nabij km 251



Figuur 2-2 Overnachtingshaven Haaften langs de Waal nabij km 936

Andere argumenten voor de keuze voor deze beide havens, waarvoor een pilotproject kan worden uitgevoerd, zijn dat,

- De industriehaven Amercentrale weliswaar niet een invaartopening heeft die veel voorkomt, maar waar wel een oplossing kan worden gevonden in een gebied met druk scheepvaartverkeer en relatieve grote sedimentatiehoeveelheden. De kolenschepen liepen in 2002 bijna vast op de ondiepte voor de haven. Een bijzondere situatie is dat via de haven koelwater voor de energiecentrale wordt ingelaten, circa 30 m<sup>3</sup>/s. Een gekozen aanpassing van de haveningang kan dus voor de situatie met en zonder koelwaterinname worden onderzocht.
- De overnachtingshaven Haaften wordt aangepast naar aanleiding van enkele scheepsongelukken die in het verleden hebben plaatsgevonden tijdens de invaart bij hoge rivierafvoer. Het bestaande plan om de haveningang aan te passen, dient als basis om een maatregel te ontwerpen die in het ontwerp past en waarmee de sedimentatie in de haveningang wordt beperkt. De haveningang van Haaften komt meer algemeen voor bij andere rivierhavens en is daarom juist geschikt voor een pilotproject.



## 3 Gegevensanalyse

### 3.1 Inleiding

De gegevens die in de verkenning zijn verzameld over de Amerhaven en de haven bij Haaften, zijn in de verdiepingsslag gebruikt, hoewel met name de informatie over de haven bij Haaften summier is.

In Barneveld, et al. (2007) zijn de volgende gegevens opgenomen over de Amerhaven:

- de bodemligging in de rivier,
- baggerhoeveelheden in en rond de havens,
- koelwaterinname Amercentrale,
- concentraties sediment in het rivierwater,
- kwaliteit van het bodemmateriaal.

In het vervolgonderzoek is een bezoek gebracht aan de Amercentrale waarin de volgende aanvullende informatie over deze haven is gevraagd:

- peilingen in de haven,
- baggergegevens van de haven over meerdere jaren,
- informatie over het aantal scheepsbewegingen per jaar in de haven,
- informatie over de koelwaterinname per jaar via de haven,
- informatie over de bodemsamenstelling in de haven.

Verder is informatie ingewonnen over de rivierbodem voor de industriehaven van de Amerhaven bij de meetdienst van Rijkswaterstaat Zuid-Holland.

Bij de dienstkring van Rijkswaterstaat Oost-Nederland is informatie gevraagd over de overnachtingshaven Haaften. Deze informatie betreft,

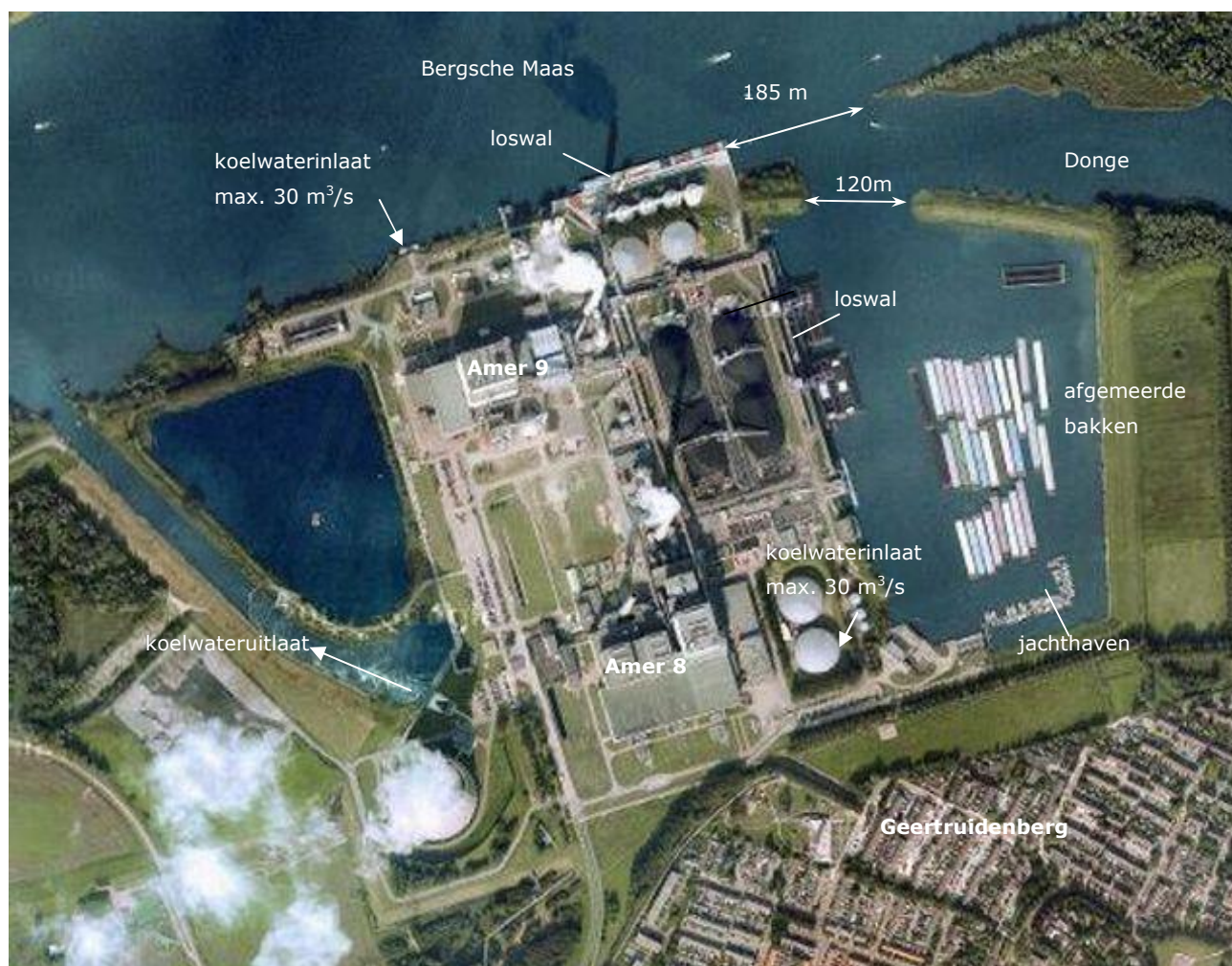
- bodempeilingen in de haveningang,
- informatie over de bodemsamenstelling in de haveningang,
- informatie over de kwaliteit van het bodemmateriaal in de haveningang,
- de plannen met de haven voor aanpassing van de inrichting en haveningang.

In dit hoofdstuk zijn de verzamelde gegevens van beide havens samengevat, alle basisgegevens van de beide havens zijn opgenomen in bijlage A.

### 3.2 Gegevens industriehaven Amercentrale

#### Algemeen

De industriehaven van de Amercentrale heeft de volgende afmetingen: de breedte is 335 m, de lengte 525 m en het oppervlak is 17,5 ha. De opening tussen de Bergsche Maas en de Donge is 185 m breed en de havenopening is 120 m breed. Het gebied rond de haven Amercentrale en de koelwaterstromen zijn in Figuur 3-1 weergegeven. De twee eenheden van de Amercentrale (Amer 8 en Amer 9) onttrekken beide circa 30 m<sup>3</sup>/s koelwater (dus gezamenlijk circa 60 m<sup>3</sup>/s) vrijwel continu gedurende het jaar. In de zomermaanden is de koelwaterinname van de eenheid Amer 8 soms lager, maar in de rest van het jaar wordt continu 30 m<sup>3</sup>/s via de haven ingenomen.



Figuur 3-1 Overzicht industriehaven bij Amercentrale met koelwaterinlaten en -uitlaat

### Scheepvaart

Dagelijks varen schepen met kolen en biomassa vanuit Rotterdam naar de centrale en meren af in de haven. Per dag komen gemiddeld 4 bakken met kolen of biobrandstof de haven in. Midden in de haven liggen duwbakken afgemeerd met kolen en biobrandstof (à 3000 tot 3500 ton). De bakken met kolen worden langs de loswal in de haven gelost. De bakken met biobrandstof worden aan de loswal langs de rivier gelost. Verder varen pleziervaartuigen van het personeel de haven in en uit naar de jachthaven in de zuidoosthoek van de haven. Er worden geen andere (niet-)commerciële havengerelateerde activiteiten ontplooid.

Het is voor de bakken (vier bakken 2 aan 2) lastig om de haven in en uit te varen. De stroming op de rivier is sterk en als de voorkant van de bak in de Dongemonding steekt of in de haven, ondervindt de achterzijde nog de kracht van de stroming. Van ondieptes hebben de bakken zelden last, al zit er soms (2002) een bak vast op de ondiepte in de rivier net voor de haveningang. Beperken van de breedte van de haveningang is ongewenst, de scheepvaart heeft de ruimte hard nodig.

### Rivierwaterstanden en afvoeren

Het maaiveld langs de Bergsche Maas in het traject nabij de Amerhaven ligt globaal tussen NAP+1 m en NAP+1,5 m. De overschrijdingsfrequentie van de afvoer bij Keizersveer is bepaald

op basis van een afvoerreeks over de periode 1997-2005. De berekeningen met FINEL2D zijn uitgevoerd voor de volgende afvoeren met bijbehorende overschrijdingsfrequentie,

- 100 m<sup>3</sup>/s 300 dagen per jaar overschreden,
- 300 m<sup>3</sup>/s 130 dagen per jaar overschreden,
- 1500 m<sup>3</sup>/s 3 dagen per jaar overschreden.

### Bodempelingen

Jaarlijks wordt de rivierbodem gepeild tot de NAP-4 m lijn inclusief de Dongemonding. De ingang van de Amerhaven verzandt met name tijdens hoogwaters en er wordt geregeld gepeild. Het onderhoudsbaggerwerk van de vaarweg in de Bergsche Maas en Amer gebeurt gemiddeld eens per vijf jaar. In 2002 en in de tweede helft van 2007 is onderhoudsbaggerwerk uitgevoerd in het riviertraject rond de haveningang tot aan de monding van het Kanaal naar de Amer en tot in de Spijkerboor.



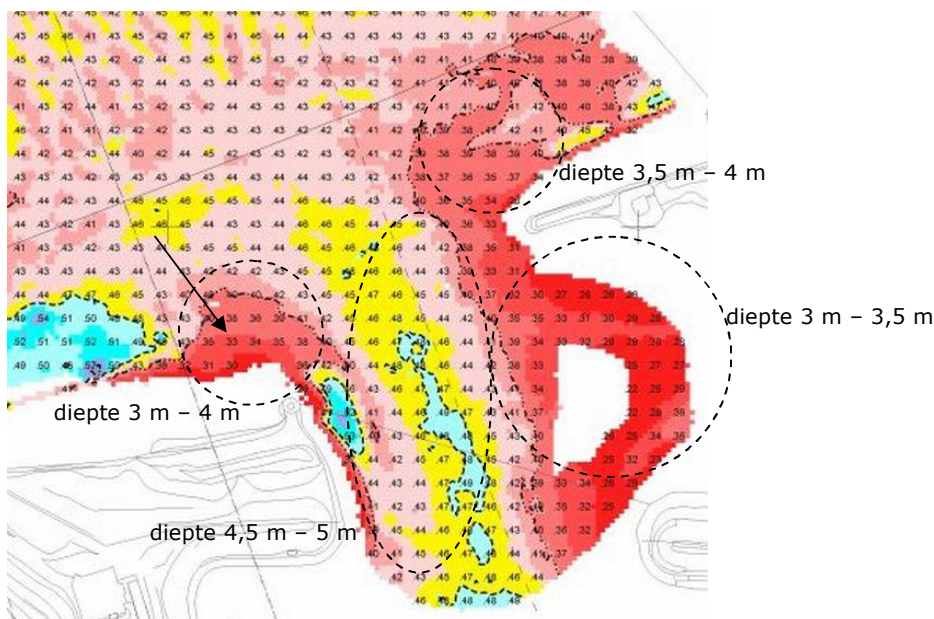
Figuur 3-2 Bodempelling industriehaven Amercentrale, april 2005

Een bodempelling in de Amerhaven uit april 2005 is beschikbaar, zie Figuur 3-2. Uit de bodempelingen is op te maken dat zich voor de haveningang in de rivier een ondiepte bevindt. De vaarweg vanuit de rivier tot de haven is duidelijk zichtbaar als een diepere geul. Ook de locaties midden in de haven aan de westzijde waar de schepen draaien, is zichtbaar als lokale

diepte (ten gevolge van de schroefstraal). Voor de waterinlaat is het ondiep evenals langs de oostelijke oever van de haven.

Vroeger (15 jaar geleden) werd er jaarlijks gebaggerd in de havenmond, nu is dat gemiddeld eens per twee jaar. Dit is mogelijk het effect van het verdwijnen van de getijwerking na ingebruikname Haringvlietsluizen of van de sloop van Amer 5 en 6 die vroeger 40 à 60 m<sup>3</sup>/s (extra) water in de haven onttrokken waardoor ook met sediment de haven in werd meegenomen. Volgens Essent is het slib in de haven niet verontreinigd. De opwoelling in de haven door scheepvaart en stroming moet minimaal zijn in verband met de koelwaterinlaat aan het eind van de haven.

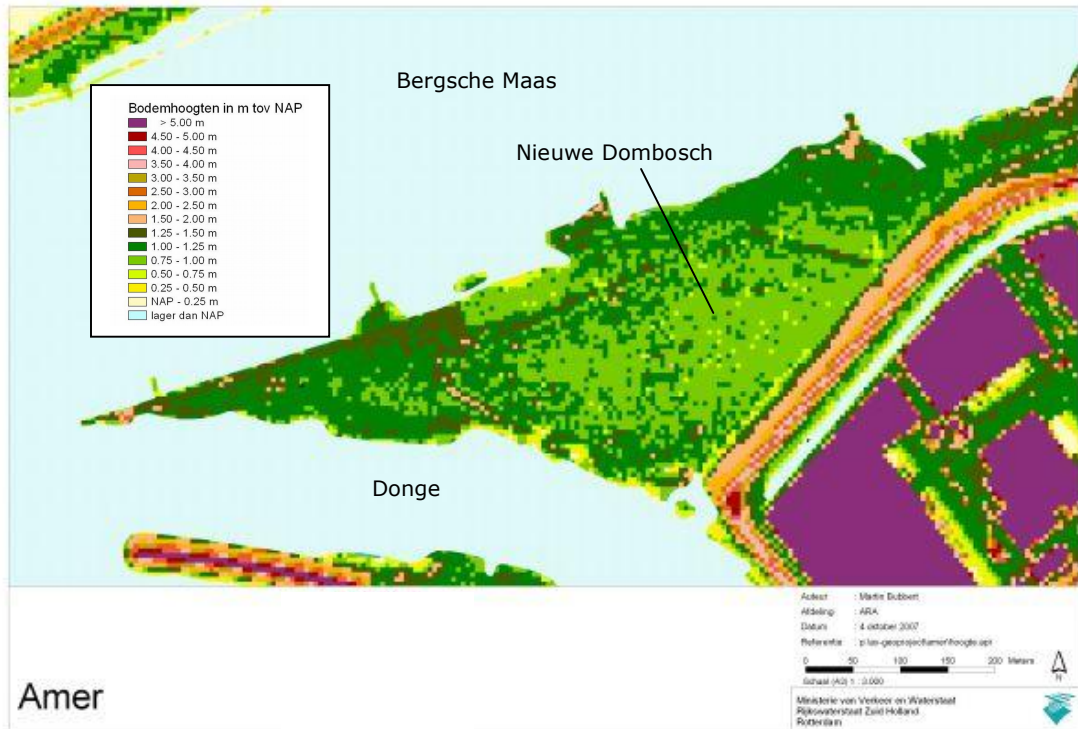
Verder is door de meetdienst van Rijkswaterstaat Zuid-Holland meegedeeld dat de locaties in de Bergsche Maas aan de oost- en westzijde van de haveningang sneller aanzanden dan in andere gedeelten van de Bergsche Maas, zie Figuur 3-3.



Figuur 3-3 Bodempelling 2006 in havenmond met indicatie waterdiepte t.o.v. NAP

In Figuur 3-4 is de bodemligging uit 2007 weergegeven in de Nieuwe Dombosch, een buitendijks bebost gebied bovenstrooms van de Dongemonding. Langs de hoofdgeul is het niveau ongeveer NAP+1,5 m en langs de primaire kering is het bodemniveau ongeveer NAP+1 m. Uit de frequentielijn van de optredende waterstanden in de Bergsche Maas bij Keizersveer, km 247,5, is afgeleid dat de uiterwaard met een frequentie inundeert tussen de 3 en 40 keer per jaar.





Figuur 3-4 Bodemniveau in de Nieuwe Dombosch

### Bodemsamenstelling

Uit de resultaten van een waterbodemonderzoek uitgevoerd in 2002 (DZH, 2002) is de korrelverdeling van het bodemmateriaal voor de Amerhaven overgenomen. De gemiddelde korreldiameter in de havenmond en Dongemonding is  $D_{50} = 0,195$  mm en  $D_{10} = 0,110$  mm. Langs de linkeroever in de Bergsche Maas is de korrelsamenstelling wat fijner,  $D_{50} = 0,130$  mm en  $D_{10} = 0,050$  mm.

Het aandeel zand in de bodem van de rivier rond de haven Amercentrale is over de jaren gezien circa 70% en het aandeel slib over die periode op die locatie is circa 30%. Het aandeel organische stoffen in de bodem is minder dan 5%.

Uit informatie van de rivierbeheerder blijkt dat de samenstelling van het gebaggerde materiaal in de Donge- en havenmonding ongeveer 50% zand is en 50% slib en dat de meeste aanzanding en aanslibbing in de havenmonding optreedt tijdens situaties met een hoge afvoer van de Maas.

Opmerking: Er bestaan figuren met de sedimentconcentratie als functie van de Maasafvoer, die tijdens het onderzoek niet beschikbaar waren.

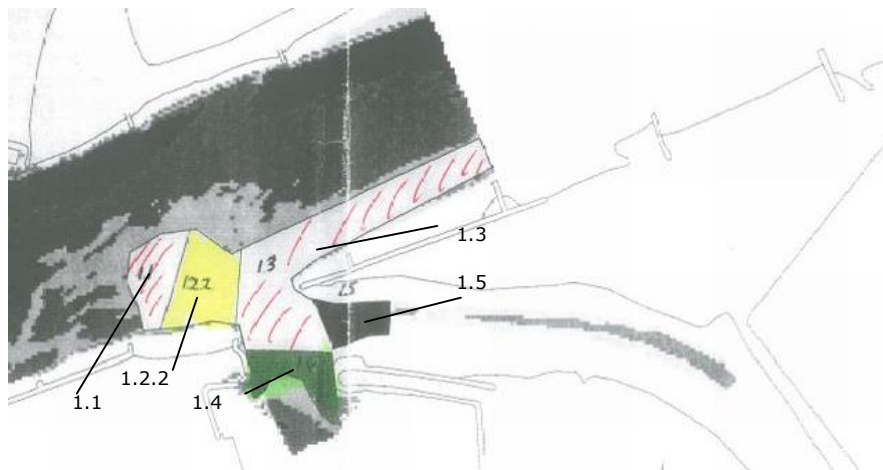
### Kwaliteit bodemmateriaal

De kwaliteit van het bodemmateriaal is onderzocht en de resultaten van het onderzoek zijn beschreven in Broekhuizen (2002). Uit de analyse van de boringen, uitgevoerd langs de beide oevers van de Bergsche Maas en Amer, blijkt voor de haveningang nauwelijks verontreinigde grond aanwezig te zijn. Het bodemmateriaal is op die locatie klasse 0 of klasse 1. De verontreinigingen die in de havenmonding bezinken, komen dus van elders. Stroomopwaarts in

de Bergsche Maas, bovenstrooms van Keizerveer, komen wel verontreinigingen met klasse 3 en klasse 4 in de bodem voor.

### Baggerhoeveelheden

De gegevens van de baggerhoeveelheid in 2002 laten zien dat de aanzanding en aanslibbing van de bodem voornamelijk plaatsvindt langs de linkeroever van de Bergsche Maas voor de ingang naar de Donge en haven (gebied 1.3) en in de Dongemonding (gebied 1.5) en haveningang (gebied 1.4), zie Figuur 3-5.



Figuur 3-5 Baggerhoeveelheden per locaties rond de haveningang van de Amerhaven in 2002

Informatie over de gebaggerde hoeveelheden verontreinigde baggerspecie tussen 1994 en 2005 geeft inzicht in de hoeveelheid klasse 3 en 4 baggerspecie die rond de Amerhaven voorkomt. Gemiddeld is over de periode 1994-2005 per jaar een hoeveelheid van 6.800 m<sup>3</sup> verontreinigde specie gebaggerd, ten opzichte van 7000 tot 11000 m<sup>3</sup>/jaar baggervolume in de havenmondning, is dat dus 100% respectievelijk 60% verontreiniging.

### Concentratie zwevend materiaal

De overschrijdingsfrequentie van de slibconcentratie is gebaseerd op de periode 1965-2006. De maandgemiddelde concentratie van 20 mg/l wordt ongeveer 120 dagen per jaar wordt overschreden. Een maandgemiddelde slibconcentratie van 50 mg/l wordt ongeveer 25 dagen per jaar overschreden en een slibconcentratie van 100 mg/l ongeveer 5 dagen per jaar. Eén dag per jaar wordt een slibconcentratie van 145 mg/l overschreden. Uit de frequentieverdeling van de afvoer bij Keizersveer (zie Figuur A-8 in bijlage A) volgen de bijbehorende afvoeren die met de gemiddelde slibconcentraties tot de volgende gemiddelde slibvrachten leiden:

- 120 dagen per jaar overschreden 20 mg/l en 330 m<sup>3</sup>/s, slibvracht 6 kg/s (500 ton/dag),
- 25 dagen per jaar overschreden 50 mg/l en 850 m<sup>3</sup>/s, slibvracht 43 kg/s (3.500 ton/dag),
- 5 dagen per jaar overschreden 100 mg/l en 1350 m<sup>3</sup>/s, slibvracht 135 kg/s (11.500 ton/dag),
- 1 dag per jaar overschreden 145 mg/l en 1870 m<sup>3</sup>/s, slibvracht 270 kg/s (23.500 ton/dag).

### 3.3 Gegevens overnachtingshaven Haaften

#### Algemeen

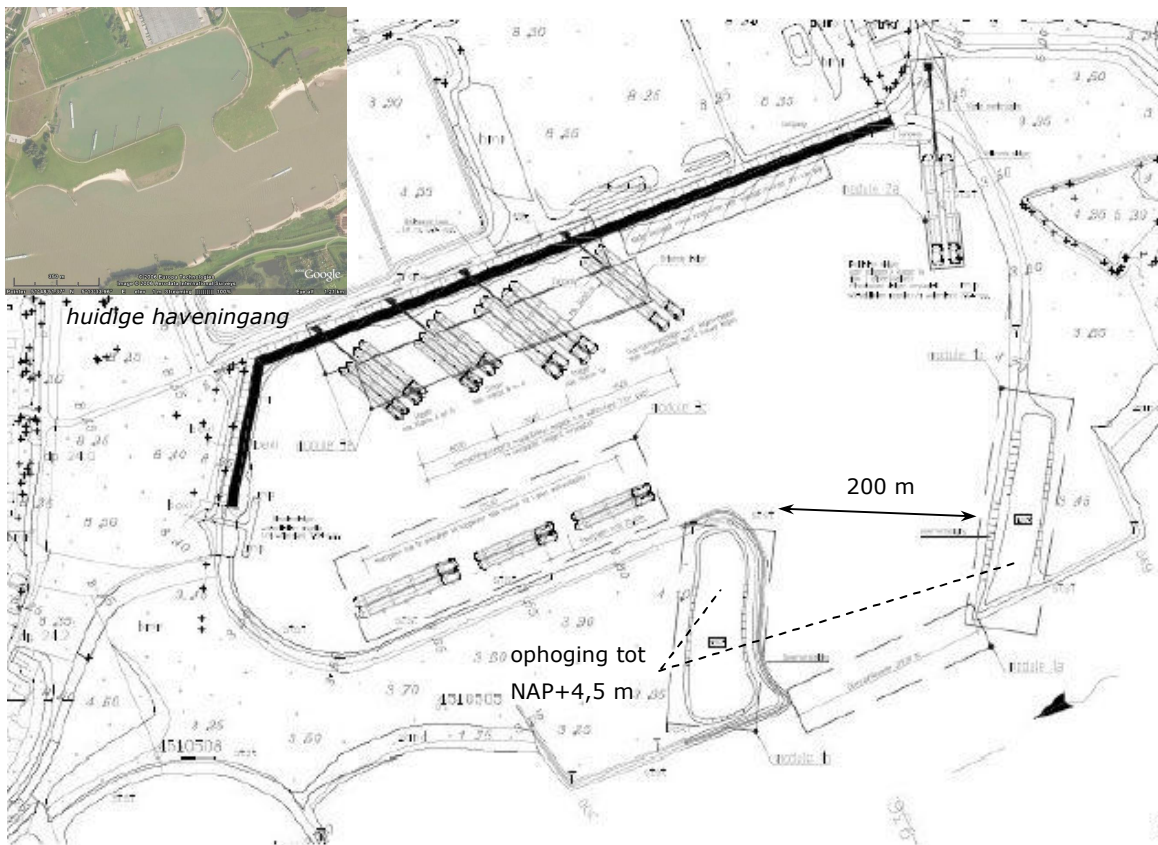
De overnachtingshaven Haaften gelegen langs de rechteroever van de Waal nabij km 936 is aangesloten via een in breedte verlopende invaartopening, zie Figuur 3-6. De haven beslaat een oppervlak van 26 ha. De invaartopening is aan de rivierzijde circa 260 m breed en aan de havenzijde circa 100 m. De haveningang is circa 180 m lang. In de haven bevinden zich vier aanlegsteigers aan de zuidwest zijde, één faciliteitensteiger aan de oostzijde en een steiger voor het overzetten van auto's aan de westzijde.



Figuur 3-6 Overzicht overnachtingshaven Haaften aan de Waal, km 936

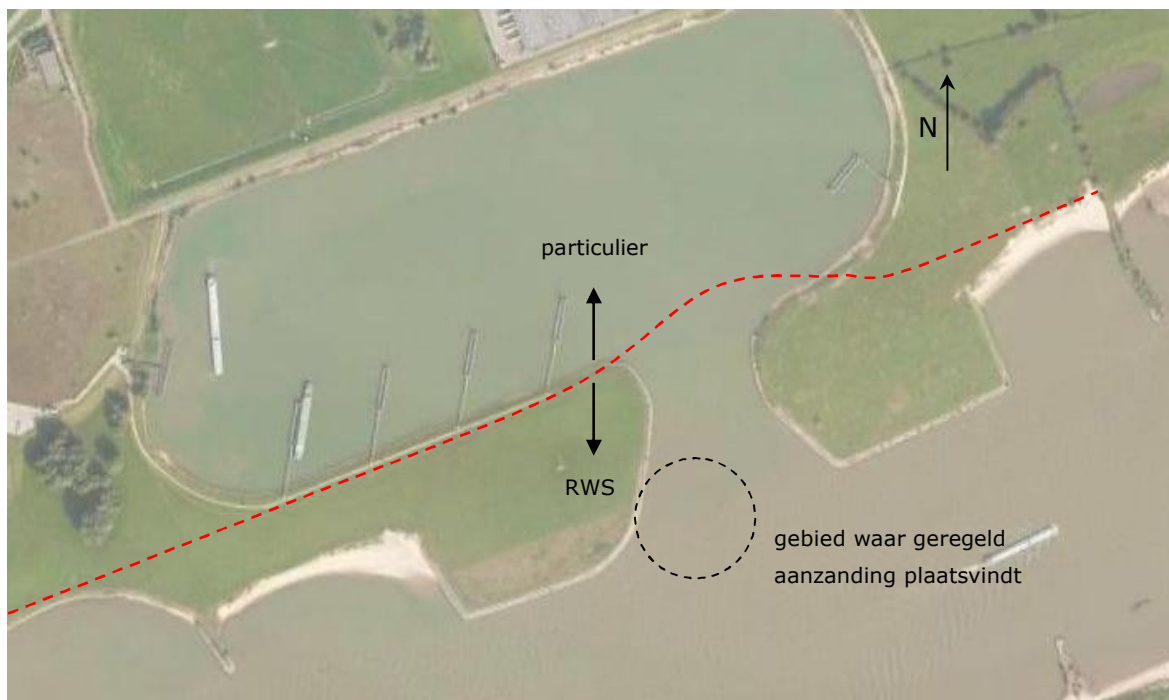
#### Plannen voor aanpassen haven

Door Grontmij (2007) is een aantal varianten voor de inrichting voorgesteld in een projectnota. Daarin is één nieuwe vorm voor de haveningang aangegeven. De haveningang wordt in het voorstel verbreed tot 200 m en de landhoofden langs de ingang worden verhoogd tot NAP+4,5 m, zie Figuur 3-7. De geschetste oplossing is een eerste aanzet tot aanpassing van de haveningang, maar de aanpassing zal niet op korte termijn (binnen bijvoorbeeld 5 jaar) worden gerealiseerd.



Figuur 3-7 Een van de voorgestelde oplossingsrichtingen voor Haafden, uit Grontmij (2007)

De eigendomsgrens rond de overnachtingshaven Haafden is weergegeven in Figuur 3-8. Maatregelen kunnen in het gebied dat eigendom is van Rijkswaterstaat worden uitgevoerd. In het particuliere gebied mogen geen activiteiten worden ontplooid.



Figuur 3-8 Eigendomsgrens overnachtingshaven Haafden langs de Waal

### **Bodempeilingen**

De bodem in de haveningang is gepeild in 2004, 2005 en 2007. De veranderingen in de periode van 2 à 3 jaar zijn gering, alleen is duidelijk dat het bodemniveau aan de zuidwest zijde van de ingang sneller verandert dan op de overige locaties, zie Figuur 3-8.

### **Bodemsamenstelling**

De bodemsamenstelling in de invaartopening van de overnachtingshaven Haaften is onderzocht in oktober 2000 en april en oktober 2002. De bevindingen zijn, zie Figuur A-31 in bijlage A:

- Uit het bodemonderzoek uitgevoerd in oktober 2000 (CSO, 2000) volgt dat er langs de westelijke zijde van de invaartopening ongeveer 2000 m<sup>3</sup> moet worden gebaggerd om de bodem op een gewenst niveau van NAP-2,15 m te krijgen. Er zijn 11 bodemmonsters genomen waarvan de bovenste 0,4 m voornamelijk bestaat uit grof zand en grind en waarin zich tussen de 2% en circa 20% (op drie locaties) slib bevindt. De kwaliteit van het slib is klasse 0 en 1.
- Uit onderzoek van afgezet slib op het wegstelsel rond de haven (Verhoeven, 2002) in maart 2002, volgt dat na een hoogwaterperiode een sliblaag van de 2 à 3 cm is afgezet. Het slib komt vermoedelijk uit de haven en de kwaliteit van het slib is klasse 2.
- Uit het bodemonderzoek uitgevoerd in oktober 2002 (Verhoeven, 2002) volgt dat er langs de westelijke zijde van de invaartopening ongeveer 2000 m<sup>3</sup> moet worden gebaggerd om de bodem op een gewenst niveau te krijgen. Er zijn 22 bodemmonsters genomen waarvan de bovenste 1,5 m à 2 m voornamelijk bestaat uit grof zand en grind en waarin zich ongeveer 2% slib bevindt. De kwaliteit van het slib is klasse 2 op deze (zuidwest) locatie, zie Figuur 3-8, waar relatief veel materiaal neerslaat zoals blijkt uit ervaring van de meetdienst.



## 4 Selectie maatregelen

### 4.1 Algemeen

De selectie van geschikte maatregelen voor de verschillende havens hangt af van de specifieke situatie rond de havens. Een belangrijk criterium bij de keuze van een maatregel is het 'universele' karakter van de maatregel die bij meerdere havens zou kunnen werken. De in de verkenning geïnventariseerde maatregelen zijn:

1. Current Deflecting Wall, hoewel meer geschikt in een getij gedomineerd gebied,
2. half-doorlatend scherm, uitgevoerd als een scherm op palen,
3. doorlatende constructie (bijvoorbeeld een palenrij),
4. evenwijdige dam bovenstrooms van de haveningang,
5. versmalling van de haveningang,
6. aanleg van een drempel voor de haveningang,
7. aanpassing van het benedenstrooms havenhoofd,
8. aanpassing van het bovenstrooms havenhoofd,
9. aanleg van een zandvang voor de haveningang.

In de verdiepingsslag is toegevoegd,

- een hoogwatergeul door de Nieuwe Dombosch.
- een zandspiraalbuis.

Het verwachte effect van de maatregelen is in Tabel 4-1 samengevat.

maatregel	Vermindering wervelvorming	Verkleining doorstroomoppervlak	Verleggen stuwpunt	Verlaging inkomende concentratie
1: Current Deflecting Wall	X?		X	X
2: Half-doorlatend scherm	X?			X
3: Doorlatende constructie	X		X	
4: Evenwijdige dam	X			X
5: Versmalling haveningang		X		
6: Aanleg drempel		X		X
7: Aanpassing benedenstrooms havenhoofd	X	X	X	
8: Aanpassing bovenstrooms havenhoofd		X	X	
9: Aanleg zandvang voor de haveningang				X
10: Hoogwatergeul door de Nieuwe Dombosch			X?	X
11: Zandspiraalbuis				X

Tabel 4-1 Overzicht geïnventariseerde maatregelen met verwachte effecten

Uit deze elf maatregelen zijn voor de Amerhaven en de haven bij Haaften de meest geschikte maatregelen geselecteerd. De selectie is gedaan op basis van de beschikbare ruimte, geringe beperking voor de scheepvaart, eenvoud van de constructie en enige zekerheid over de te verwachten effecten.

## 4.2 Industriehaven Amercentrale

In de verkenning voor de industriehaven Amercentrale zijn maatregelen genoemd die specifiek voor deze haven geschikt zouden zijn om de sedimentatie te beperken, zie Barneveld et al. (2007). Toegevoegd is de hoogwatergeul door de Nieuwe Dombosch en een zandspiraalbuis. Voor de Amerhaven komen de volgende maatregelen in aanmerking voor nadere uitwerking:

1. Versmallen van de havenmond.
2. Drempel met scherm bovenstrooms van de haveningang.
3. Doorlatende constructie bovenstrooms van de haveningang.
4. Aanleg van een hoogwatergeul door de Nieuwe Dombosch (buitendijkse uiterwaard bovenstrooms van de Dongemonding).
5. Zandspiraalbuis.

### Versmallen van de haveningang aan de benedenstroomse zijde

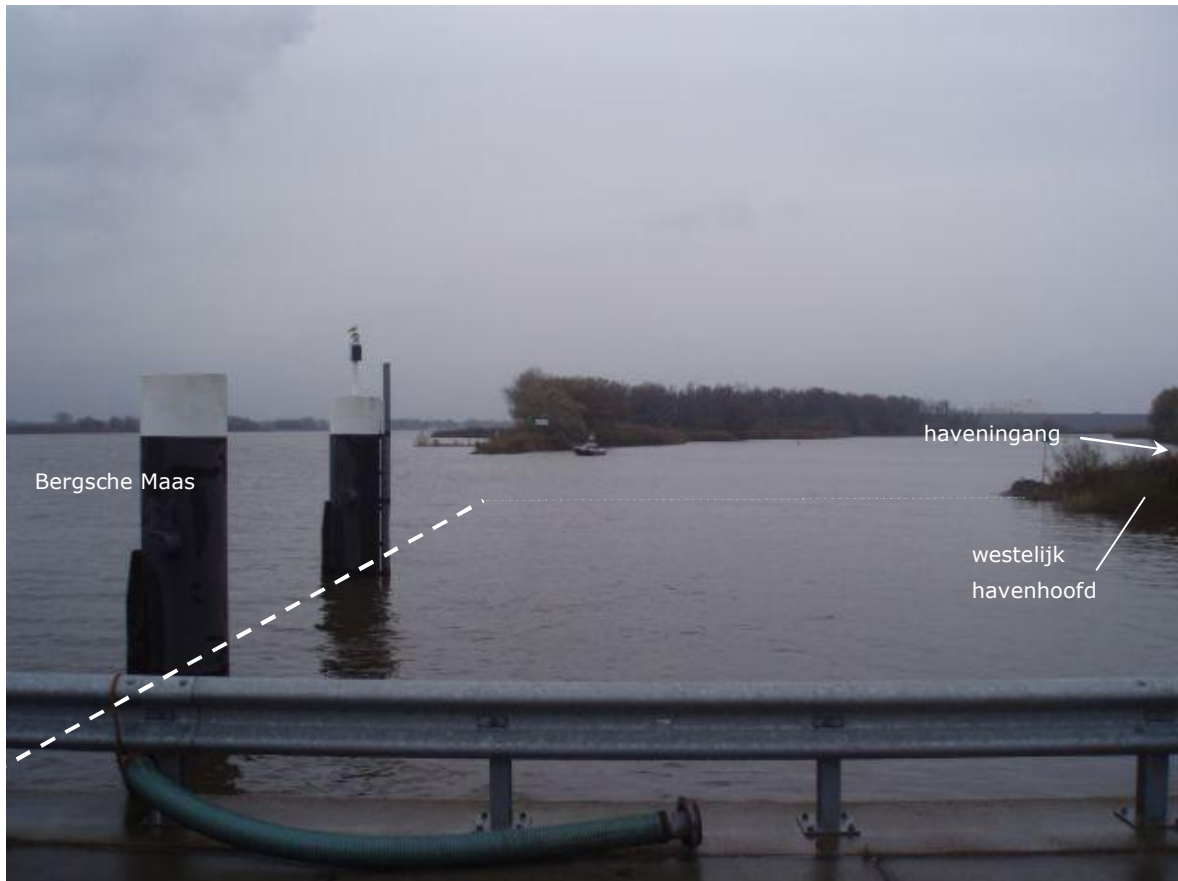
Een effectieve maatregel is het versmallen van de haveningang aan de benedenstroomse zijde, zoals aangegeven in Figuur 4-1. De maatregel is in principe effectief aangezien de grootte van de neer wordt beperkt en de lengte waarover uitwisseling van rivierwater en water in de haven kan plaatsvinden, wordt gereduceerd. Een reductie van de havenopening met 30% zou theoretisch een even grote (theoretisch maximaal haalbare) reductie betekenen van de sedimentinstroom naar de haven. Met een goed ontwerp van de vorm van de versmalling kan het stuwpunt, aan de benedenstroomse haveningang, worden verlegd waarmee wervels meer in de richting van de rivier worden gestuurd.



Figuur 4-1 Principe van versmallen haveningang industriehaven Amercentrale

De versmalling van de haveningang is in principe mogelijk aangezien in het verlengde van de loswal langs de rivier meerpalen staan waaraan lange schepen worden afgemeerd, zie Figuur 4-2. De versmalling kan ongeveer tot aan de westelijke dam van de haveningang doorlopen. Of dit voor de scheepvaart een gewenste maatregel is, hangt af van de ligging van de vaarweg en de minimaal benodigde breedte van de havenopening.



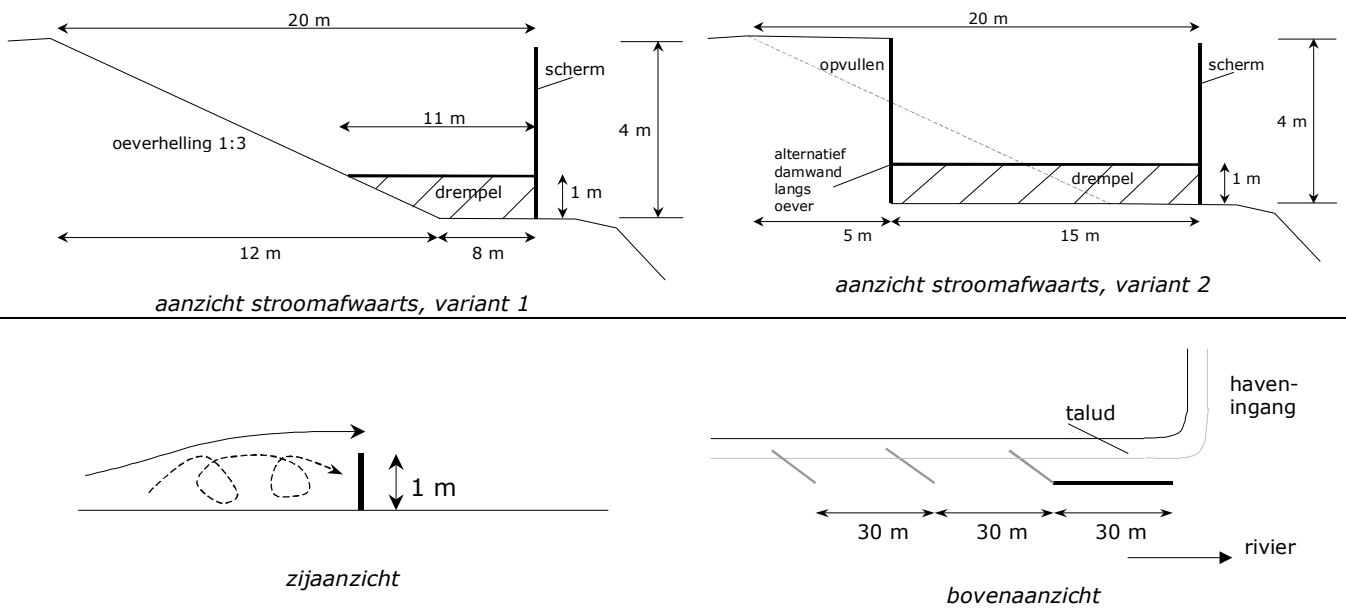


Figuur 4-2 Foto haveningang rivier vanaf loswal langs Bergsche Maas in oostelijke richting genomen

Voor deze haven is een bijzonder aspect dat via de haveningang koelwater wordt onttrokken aan de rivier. Dus ongeacht de versmalling van de haveningang wordt met het koelwater sediment naar de haven getransporteerd. Een versmalling van de haveningang is relatief eenvoudig te plaatsen en weer te verwijderen, een belangrijke eis voor het uitvoeren een pilotproject.

### **Drempel met parallelle schermen bovenstrooms van de haveningang**

Voor de industriehaven Amercentrale is in de verkenning gekozen voor een drempel met parallelle schermen bovenstrooms van de haveningang, zie Figuur 4-3. Door de onderwater drempels wordt een spiraalstroming nabij de bodem opgewekt, die het bodemmateriaal in de richting van de rivier stuurt en daarmee mogelijk voor de haveningang weghoudt. Er worden drie drempels voorzien die nodig zijn om de spiraalstroming op te wekken en te laten ontwikkelen. Een nadeel van deze maatregel is dat tijdens hoogwatersituaties sterke wervels kunnen optreden langs het parallelle scherm en aan het eind van het scherm, die veel sediment kunnen transporteren. Daarnaast zijn er twee loslaatpunten vlak bij de haveningang, namelijk één aan het eind van de bestaande oever en één aan het eind van het scherm, zie Figuur 4-4. Daardoor kan het water, met verhoogde sedimentconcentratie tijdens hoge afvoeren, gemakkelijk de haven inkomen, zeker als koelwater wordt ingelaten. De verwachting is dat deze maatregel de hoeveelheid zand die in de haveningang neerslaat reduceert met 30% tot 50%. Dit type maatregel wekt een drie-dimensionaal stroomveld op met spiraalstroming, hetgeen niet in een twee-dimensionaal rekenmodel is te schematiseren. Een drie-dimensionaal rekenmodel zou gebaseerd moeten zijn op een niet-hydrostatische drukverdeling in de verticaal. Zo'n rekenmodel is momenteel niet voorhanden.



Figuur 4-3 Schets van drempel met scherm bovenstrooms van ingang industriehaven Amercentrale



Figuur 4-4 Principe drempel met scherm bovenstrooms van ingang industriehaven Amercentrale

**Doorlatende constructie bovenstrooms van de haveningang**

Een aantal doorlatende constructies geplaatst bovenstrooms van de haveningang is een universeel toepasbare maatregel die de snelheidsverschillen tussen de rivier en haven over een groter gebied uitspreidt en daarmee de uitwisseling van sedimentrijk water vanuit de rivier naar de haven beperkt. Of dit ook werkt voor een situatie met koelwaterinname is onbekend, maar de verwachting is dat de sedimentconcentratie voor de haveningang erdoor reduceert. Een constructie in de vorm van bijvoorbeeld palenrij is eenvoudig te plaatsen en ook weer eenvoudig te verwijderen. Een doorlatende constructie kan in principe niet in een twee-dimensionaal rekenmodel worden geschematiseerd. Meestal wordt een dergelijke constructie als extra

weerstand geschematiseerd in een rekenmodel. Het effect van een doorlatende constructie kan dus niet vooraf worden gekwantificeerd.



Figuur 4-5 Principe van doorlatende constructies bovenstrooms haveningang industriehaven Amercentrale

**Hoogwatergeul door de Nieuwe Dombosch**

Een hoogwatergeul door de Nieuwe Dombosch, een uiterwaard bovenstrooms gelegen van de Dongemonding, kan worden aangelegd om de neer in de havenmond 'weg te drukken' door de stroming voor de havenmond langs.



Figuur 4-6 Aanleg nevengeul

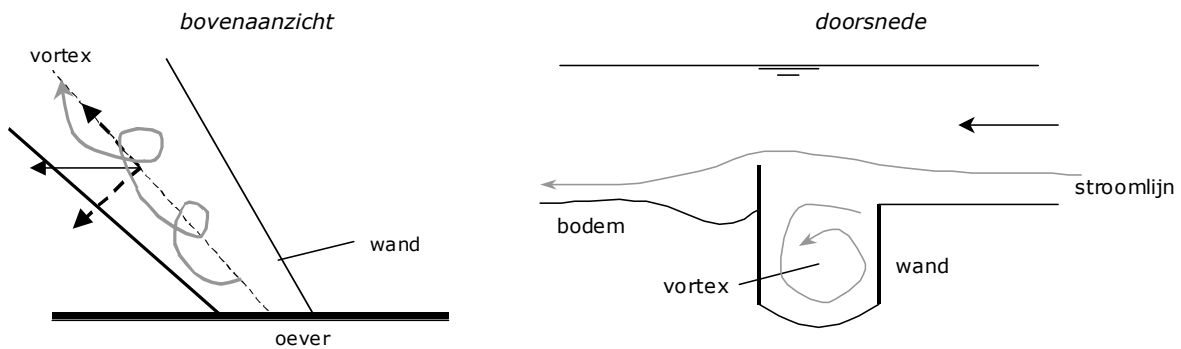
De hoogwatergeul stroomt alleen tijdens hoogwatersituaties mee. Bovenstrooms van de nevengeul is daardoor een drempel nodig. De drempel kan dusdanig vorm worden gegeven dat sedimentarm water via de nevengeul door de Dongemonding weer naar de Bergsche Maas stroomt. De sedimentatie in de Dongemonding en in de havenmondning wordt tijdens het meestromen (situatie met hoge afvoer) van de nevengeul beperkt aangezien de stroming, in de Dongemonding en voor de haveningang, naar de rivier is gericht. Aan de benedenstroomse zijde van de nevengeul is geen drempel aanwezig, waardoor de nevengeul onder alle omstandigheden water bevat. Mogelijk dat door de versterkte stroming in de Dongemonding, de neren in de Dongemonding en haveningang worden 'weggedrukt'. Daardoor neemt de uitwisseling van water tussen rivier en haven af. Ook het stuwpunt aan de benedenstroomse zijde van de haveningang, kan door de versterkte stroming 'voor de haven langs' verschuiven naar de rivier zodat de rivierstroming meer in de rivier blijft en er daardoor ook minder kans is op uitwisseling tussen rivier en haven.

### Zandspiraalbuizen

Een zandspiraalbuis is een maatregel die veel is toegepast voor inlaten van irrigatiekanalen om de sedimentinname te beperken. Het principe van de maatregel is dat sedimentrijk water voor een inlaat of haven nabij de bodem in de richting van de rivieras wordt geleid. De maatregel bestaat uit twee wanden die onder een hoek met de oeverlijn in de richting van de rivieras worden geplaatst. De stroming over de 'buis' wekt een spiraalstroming (vortex) in de buis op. Het bodemmateriaal dat nabij de bodem wordt getransporteerd, valt in de buis en wordt naar de rivieras getransporteerd. Door de toenemende stroomsnelheid van oever naar rivieras, neemt de sterkte van de spiraalstroming toe. Om de transportcapaciteit langs de buis gelijk te houden, verbreed de buis. Meerdere zandspiraalbuizen na elkaar versterken het effect. In Figuur 4-7 is de locatie van de zandspiraalbuizen aangegeven voor de Amerhaven en in Figuur 4-8 is het principe van de werking geschetst.



Figuur 4-7 Aanleg zandspiraalbuizen



Figuur 4-8 Principe werking van een zandspiraalbuis

## 4.3 Overnachtingshaven Haaften

### Algemeen

In de projectnota overnachtingshaven Haaften (Grontmij, 2007) is een aantal oplossingsrichtingen aangegeven voor de aanpassing en inrichting van deze haven. In de verdiepingsslag richten wij ons op maatregelen rond de haveningang. Gezien de onzekerheid over wanneer de haveninrichting en havenmond zullen worden aangepast (3 tot 5 jaar), wordt uitgegaan van de huidige situatie. De keuze van de maatregelen is zo, dat de maatregel effectief moet zijn, maar ook eenvoudig en daarmee eenvoudig te verwijderen als de haven wordt aangepast. De volgende geschikte maatregelen zijn voor deze haven geselecteerd:

- 1 het plaatsen van doorlatende constructies (bijvoorbeeld palenrijen) rond de haveningang,
- 2 het verkleinen van de breedte van de haveningang aan de bovenstroomse zijde met een doorlatende constructie parallel aan de rivieras,
- 3 het plaatsen van drempels en een parallel scherm bovenstrooms van de haveningang,
- 4 het plaatsen van zandspiraalbuizen.

### Plaatsen doorlatende kribben rond de haveningang

Aan de benedenstroomse zijde van de haveningang vindt aanzanding plaats zoals door de dienstkring is aangegeven, zie Figuur 3-8. Deze aanzanding wordt voornamelijk veroorzaakt door de opgewekte spiraalstroming aan de bovenstroomse zijde van de haveningang. Beperking van de spiraalstroming vereist een speciale maatregel. Dwars op de rivieras worden doorlatende kribben geplaatst die vanaf de normaallijn doorlopen in het winterbed. De huidige oeverlijn wordt teruggelegd zodat er kribvakken ontstaan. Met de aanleg van doorlatende kribben, boven- en benedenstrooms van de haveningang, wordt de spiraalstroming beïnvloed. Hoe sterk is vooraf niet te zeggen. Wel zal de stroomsnelheidsverdeling tussen de rivier en havenmonding dwars op de rivieras geleidelijker zijn (over een grotere afstand vanuit de oever afnemen van hoog naar laag). Of dit de aanzanding op de aangegeven locaties ook werkelijk beperkt, is zonder nader onderzoek niet te bepalen.

Met het plaatsen van doorlatende kribben langs de rechter rivieroever van de haveningang wordt de snelheidsgradiënt tussen rivier en haven over een grotere afstand uitgespreid en daarmee wordt de uitwisseling van sedimentrijk water vanuit de rivier naar de haven beperkt. Een doorlatende constructie (in de vorm van bijvoorbeeld een palenrij) is eenvoudig te plaatsen en ook weer eenvoudig te verwijderen, een eis voor een pilotproject. Een doorlatende constructie kan in principe niet goed in een twee-dimensionaal rekenmodel worden geschematiseerd. Meestal wordt een dergelijke constructie als extra weerstand geschematiseerd in een twee-dimensionaal rekenmodel.

De aanpassing van de haveningang wordt als volgt voorgesteld. De gestrekte oever wordt teruggelegd over een afstand van circa 50 m en vervangen door doorlatende kribben, bijvoorbeeld opgebouwd uit palenrijen. De palenrijen eindigen op de normaallijn langs de rechteroever en lopen circa 150 m door tot op het winterbed om tijdens hoogwateromstandigheden ook daar de snelheidsgradiënt te reduceren. De breedte van de haveningang is hiermee gereduceerd tot circa 150 m. De vorm van de haveningang wordt eivormig, om een neer te fixeren in de haveningang.



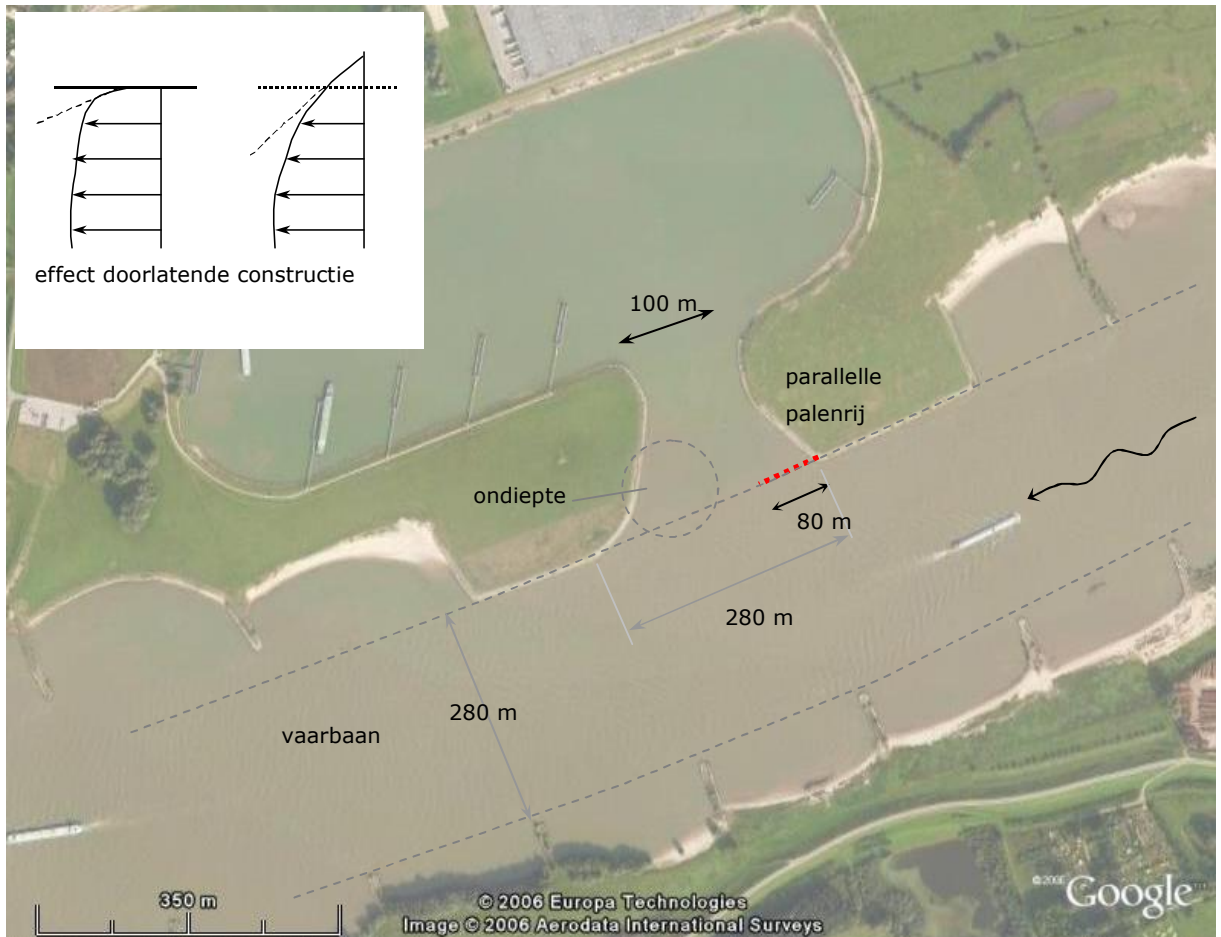
Figuur 4-9 Principe doorlatende kribben bovenstrooms haveningang overnachtingshaven Haafden

**Verkleinen haveningang aan de bovenstroomse zijde met doorlatende constructie**

Aan de benedenstroomse zijde van de haveningang vindt aanzanding plaats, die voornamelijk wordt veroorzaakt door de opgewekte spiraalstroming aan de bovenstroomse zijde van de haveningang. Beperking van de spiraalstroming vereist een speciale maatregel. Met de aanleg van een parallelle doorlatende constructie (bijvoorbeeld palenrij met openingen van een paaldiameter) bovenstrooms van de haveningang wordt de spiraalstroming beïnvloed, hoe sterk is echter vooraf niet te zeggen.

Het verwachte effect van een parallel palenscherm is een verkorting van de afstand waarover water uitwisselt tussen de rivier en de haven. Verder kan met een doorlatende palenrij de horizontale gradiënt van de snelheid tussen rivier en haven verminderen. Het water achter de palenrij wordt meegesleept door de hoofdstroom en krijgt dus al een snelheid. Dit in tegenstelling tot een dicht scherm waarlangs de snelheid nul is.

Versmallen van de invaartopening tot 200 m is in principe effectief aangezien de grootte van de neer wordt beperkt en de lengte waarover uitwisseling van rivierwater en water in de haven kan plaatsvinden. Een reductie van de havenopening met circa 30% (200 m in plaats van 280 m) zou theoretisch een even grote (theoretisch maximaal haalbare) reductie betekenen van de sedimentinstroom naar de haven. Met een goed ontwerp van de vorm van de versmalling kan het stuwpunt, aan de benedenstroomse haveningang, worden verlegd waarmee wervels meer in de richting van de rivier worden gestuurd.



Figuur 4-10 Principe versmallen haveningang overnachtingshaven Haaften

### Drempels met parallel scherm bovenstrooms haveningang

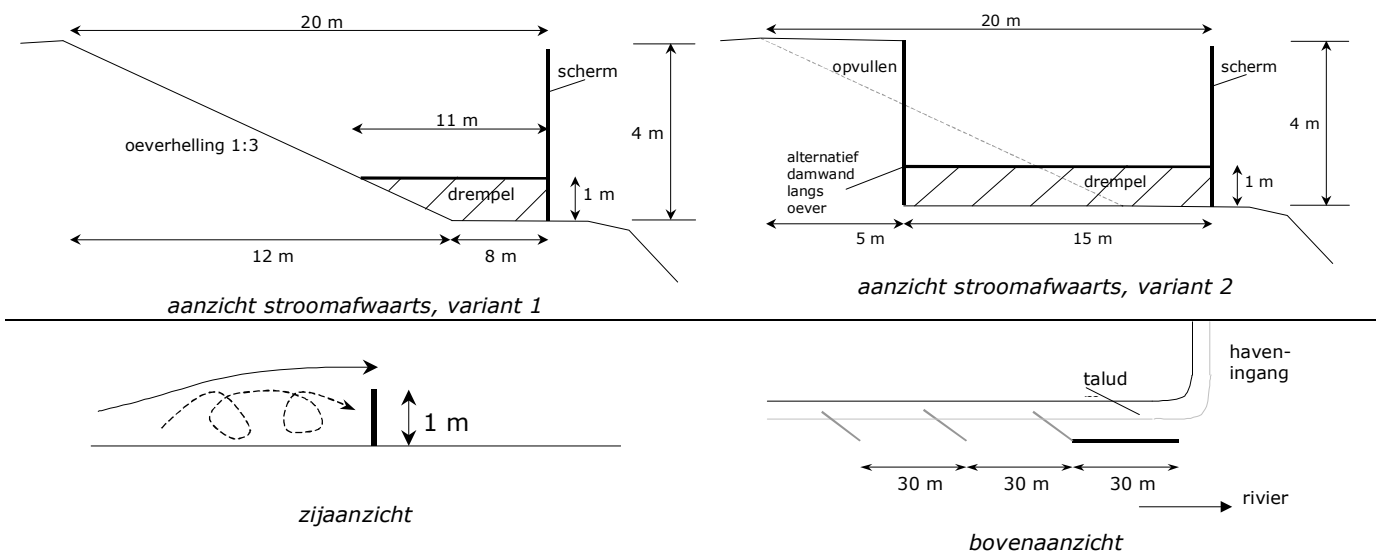
Aan de benedenstroomse zijde van de haveningang vindt aanzanding plaats, die voornamelijk wordt veroorzaakt door de opgewekte spiraalstroming aan de bovenstroomse zijde van de haveningang. Beperking van de spiraalstroming vereist een speciale maatregel, die met de aanleg van drempels en een parallel scherm kan worden beïnvloed. De maatregel komt in de vaarbaan te liggen en het is de vraag of dat is toegestaan.

Door de onderwater drempels wordt een spiraalstroming nabij de bodem opgewekt die het bodemmateriaal in de richting van de rivier stuurt en daarmee mogelijk voor de haveningang weghoudt. Er worden drie drempels voorzien die nodig zijn om de spiraalstroming op te wekken en te laten ontwikkelen. In Moges (2006) is de werking van meerdere drempels onderzocht, waaruit dit blijkt. Een nadeel van deze maatregel is dat tijdens hoogwatersituaties sterke wervels kunnen optreden langs het parallelle scherm en aan het eind van het scherm, die veel sediment kunnen transporteren. Daarnaast zijn er twee loslaatpunten vlak bij de haveningang,

namelijk één aan het eind van de bestaande oever en één aan het eind van het scherm, zie Figuur 4-12. Daardoor kan het water, met verhoogde sedimentconcentratie tijdens hoge afvoeren, gemakkelijk de haven inkomen. Verder wekt dit type maatregel een drie-dimensionaal stroomveld op met spiraalstroming, hetgeen niet in een twee-dimensionaal rekenmodel is te schematiseren. Een drie-dimensionaal rekenmodel zou gebaseerd moeten zijn op een niet-hydrostatische drukverdeling in de verticaal. Zo'n rekenmodel is niet voorhanden.



Figuur 4-11 Principe haveningang met drempels en parallel scherm overnachtingshaven Haafden



Figuur 4-12 Schets van drempels met scherm bovenstrooms van ingang overnachtingshaven Haafden

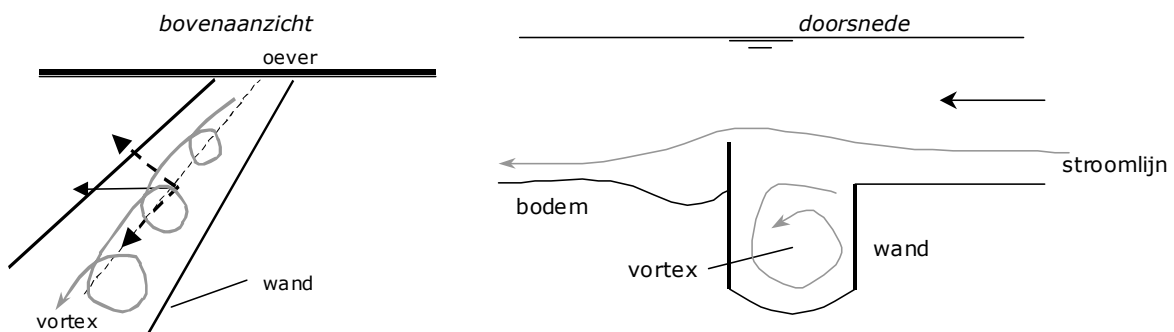


**Zandspiraalbuizen**

Een zandspiraalbuis is een maatregel die veel is toegepast voor inlaten van irrigatiekanalen om de sedimentinname te beperken. Het principe van de maatregel is dat sedimentrijk water voor een inlaat of haven nabij de bodem in de richting van de rivieras wordt geleid. De maatregel bestaat uit twee wanden die onder een hoek van de oever in de richting van de rivieras worden geplaatst. De stroming over de 'buis' wekt een spiraalstroming (vortex) in de buis op. Het bodemmateriaal dat nabij de bodem wordt getransporteerd, valt in de buis en wordt naar de rivieras getransporteerd. Door de toenemende stroomsnelheid van oever naar rivieras, neemt de sterkte van de spiraalstroming toe. Om de transportcapaciteit langs de buis gelijk te houden, verbreed de buis. Meerdere zandspiraalbuizen na elkaar versterken het effect. In Figuur 4-13 is de locatie van de zandspiraalbuizen aangegeven voor de overnachtingshaven van Haaften en in Figuur 4-14 is het principe van de werking geschetst.



Figuur 4-13 Aanleg zandspiraalbuizen voor de overnachtingshaven Haaften



Figuur 4-14 Principe werking van een zandspiraalbuis



## 5 Berekeningen Amerhaven

### 5.1 Inleiding

In het kader van het WINN-project "Reductie sedimentatie in havens" is de rivierhaven naast de Amercentrale van energiebedrijf Essent te Geertruidenberg (hierna te noemen: de Amerhaven) geselecteerd voor nader onderzoek. Het gestelde doel is het ontwerpen van een ingreep in deze haven die mogelijk als pilot-project kan worden gerealiseerd. Deze ingreep zou een reductie moeten opleveren van het huidige probleem van sedimentatie in de haven, met name in de havenmonding. Teneinde meer inzicht te krijgen in het sedimentatieprobleem en de oorzaak daarvan, is door Svašek Hydraulics een reeks modelberekeningen uitgevoerd. Hiervoor is gebruik gemaakt van het simulatiepakket FINEL2D.

Voor zes verschillende gevallen is een "nulsimulatie" van de huidige situatie gemaakt, vervolgens is in deze zes referentiegevallen een tweetal ingrepen in de geometrie aangebracht. De effectiviteit van deze ingrepen is in FINEL2D onderzocht, zowel voor de twee losstaande ingrepen als voor de combinatie van beide. In dit hoofdstuk zijn de opzet en de resultaten van de berekeningen beschreven.

### 5.2 Achtergronden van FINEL2D

FINEL2D is een pakket op basis van de Finite Element Method (FEM), dat binnen Svašek Hydraulics is ontstaan en momenteel vanuit de TU Delft wordt doorontwikkeld door ir. R.J. Labeur. Het model simuleert in twee dimensies de dieptegemiddelde ondiepwatervergelijkingen en bevat daarnaast vele opties voor het simuleren van zand- en slibtransport, morfologie, turbulentie en korte golven. In de onderhavige berekeningen is gebruik gemaakt van de slibtransportmodule; hiermee is de verspreiding van meegevoerd materiaal onder invloed van de 2D-waterbeweging onderzocht.

In dit project is gebruik gemaakt van de meest recente versie van FINEL2D (oktober 2007), die gebaseerd is op een symbiose van twee Finite Element-technieken: de Continuous Galerkin-methode (CG) en de Discontinuous Galerkin-methode (DG). Deze beide methoden zijn samengevoegd tot de vernieuwende Galerkin Interface Stabilisation-methode (GIS). De nieuwe versie van FINEL2D maakt gebruik van een rekenrooster van driehoekige elementen en een impliciete tijdsintegratie.

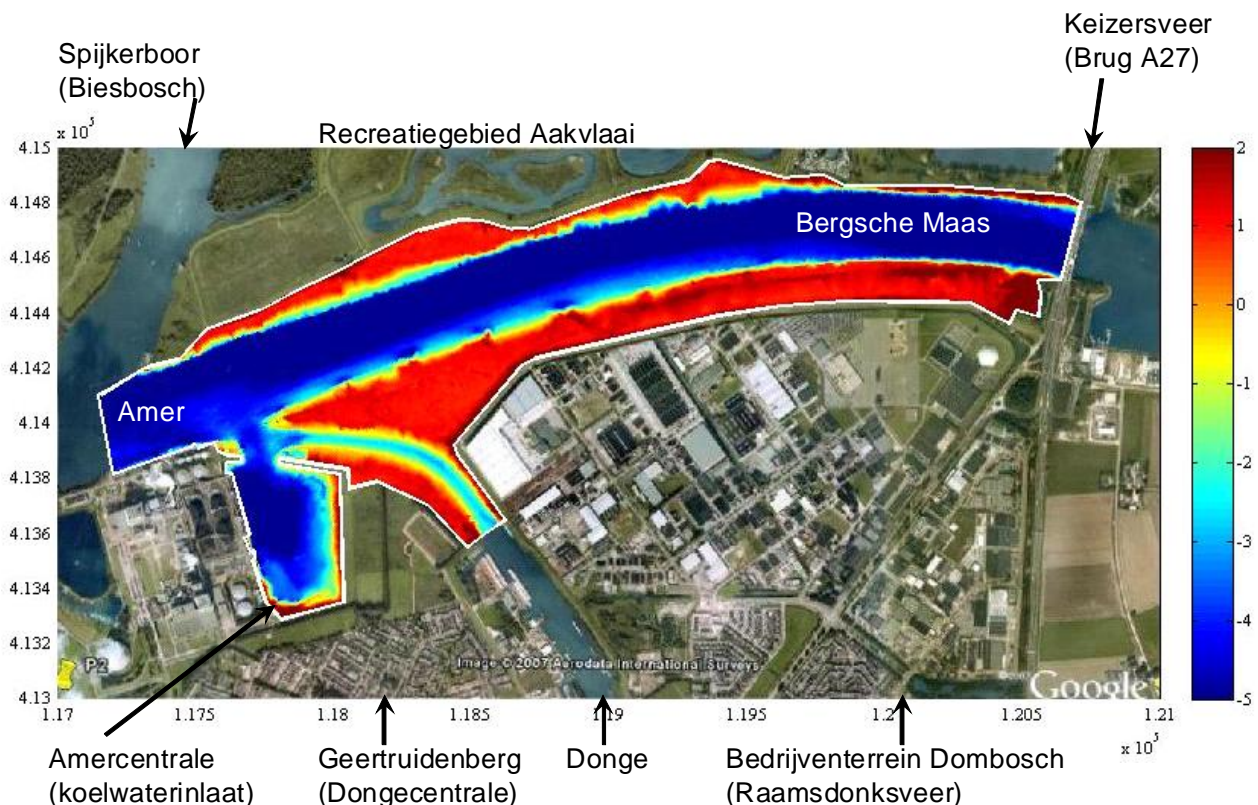
De hoofdvariabelen van het model (in dit geval de waterstand, de horizontale stroomsnelheden en de slibconcentraties) zijn gedefinieerd op de knooppunten van het driehoekennet, in tegenstelling tot eerdere versies van het model, waar deze waren gelokaliseerd in het midden van ieder element. Aangezien er grofweg tweemaal zoveel elementen als knopen zijn, betekent dit een geheugenbesparing van rond de 50%.

Aangezien in het model van de Amerhaven droogvallende gebieden kunnen voorkomen (zoals uiterwaarden), is FINEL2D voorzien van een "drying-and-flooding-procedure" die drooggevallen elementen waar nodig kan buitensluiten uit de simulatie.

### 5.3 Modelopzet, invoer en randvoorwaarden

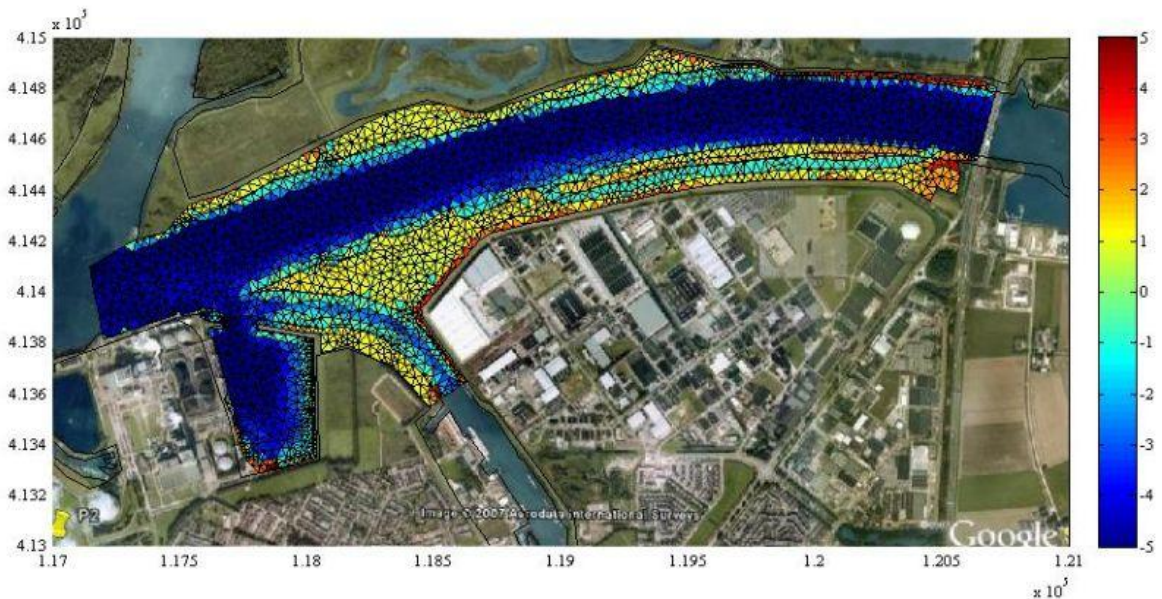
Het modeldomein is een uitgebreid gebied in de directe omgeving van de Amerhaven. Het model beslaat het gehele buitendijkse gebied van de Amer en de Bergsche Maas tussen de verkeersbrug bij Keizersveer (A27) en de monding van het Spijkerboor (aan de grens met de Biesbosch). Dit gebied bevat een sectie van ca. 3,5 km lengte van de Amer en de Bergsche Maas met bijbehorende uiterwaarden, de monding van de rivier de Donge, het hoger gelegen beboste terrein Nieuw Dombosch en de Amerhaven zelf. Het totale model is ongeveer 2,1 km<sup>2</sup> groot, en is gelegen binnen een rechthoek van 8 km<sup>2</sup> in het coördinatenstelsel van het Rijksdriehoekennet (RD). De benedenstroomse modelrand ligt ongeveer 80 waterdieptes van de monding van de Amerhaven vandaan, hetgeen voldoende is voor een betrouwbare simulatie van de waterbeweging rond de havenmond.

Zie Figuur 5-1 voor een overzicht van het rekendomein in zijn geografische context. De kleurcontouren en bijbehorende legenda geven de bodemligging aan ten opzichte van NAP. Het FINEL-rekengebied (begrensd door de witte lijn) en omgeving. Linksonder in beeld de Amercentrale met haven en koelwaterinlaat. De Dongemonding en de havenmond vallen in feite samen. Oostelijk van de Donge het hooggelegen buitendijkse gebied Nieuw Dombosch. Aan de noordkant een ontpolderd gedeelte van de Biesbosch (Aakvlaai) en links hiervan de monding van het Spijkerboor.



Figuur 5-1 Het FINEL rekengebied, begrensd door de witte lijn, omgeving en niveau m t.o.v. NAP

Het rekenrooster bevat 18.548 knooppunten en 36.354 driehoekige elementen, zie Figuur 5-2. De gemiddelde horizontale afstand tussen twee knopen bedraagt 7,5 m; in het gebied van de havenmond, waar de meest complexe stroming en sedimentatie plaatsvindt, is de resolutie verfijnd tot 4,0 m (de ordegrrootte van de waterdiepte).



Figuur 5-2 Rekenrooster voor FINEL2D van Bergsche Maas, Donge en Amerhaven

De bodemliggingsgegevens voor het model zijn afkomstig van een groot aantal lodingen van de rivier en de haven (tussen 2000 en 2006) en van GIS-data uit het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN). Voor de Amer en de Bergsche Maas zijn RWS-multi-beammetingen uit 2006 gebruikt met een gridresolutie van 2 m; voor de Donge en de havenmond zijn single-beammetingen met een resolutie van 5 m beschikbaar. Voor de Amerhaven zelf is een loding gebruikt uit januari 2005, verricht door Hakkers te Werkendam. De aldus samengestelde bodemligging kent bodemniveaus variërend van  $< \text{NAP} -10 \text{ m}$  (bodem vaargeul Bergsche Maas) tot  $> \text{NAP} +2 \text{ m}$  (landzijde uiterwaarden).

De benodigde ruwheidsgegevens zijn gebaseerd op de corresponderende ruwheden in het WAQUA-model van het Noordelijk Deltabekken (NDB). Dit zijn Nikuradse-ruwheden ( $k$ ) in meters. Aangezien de ruwheid in het algemeen veelal wordt gebruikt als calibratieparameter (dit is in het WAQUA-model ook duidelijk af te lezen), is het mogelijk om vraagtekens te plaatsen bij de nauwkeurigheid van deze gegevens. Daarom zijn in het FINEL-model slechts globale ruwheden toegepast, variërend van  $k = 0,02 \text{ m}$  op de rivierbodem tot  $k = 0,50 \text{ m}$  op begroeide uiterwaarden.

De benodigde hydraulische randvoorwaarden voor de rivier zijn gebaseerd op langjarige waterstands- en debietmetingen bij Keizersveer. De berekeningen zijn uitgevoerd voor drie representatieve debieten bij Keizersveer: een lage, gemiddelde en hoge rivierafvoer (respectievelijk  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  en  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Deze drie afvoerwaarden zijn tussen 2000 en 2006 respectievelijk 20%, 60% en 99% van de tijd onderschreden. De bijbehorende gemiddelde waterstand in deze drie gevallen (verticaal getij niet meegerekend) bedraagt  $\text{NAP} +0,4 \text{ m}$ ,  $+0,6 \text{ m}$  en  $+1,2 \text{ m}$  ter hoogte van de monding van het Spijkerboor. De rivierafvoer wordt door het verticale getij niet of nauwelijks beïnvloed en in deze berekeningen wordt het getij dan ook buiten beschouwing gelaten.

De Amercentrale onttrekt gedurende een zeer groot deel van het jaar continu een koelwaterdebiet van  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  aan de naastgelegen haven. In de zuidwestelijke hoek van de haven wordt dan ook een negatieve debietrandvoorwaarde van 0 of  $-30 \text{ m}^3/\text{s}$  opgelegd, zie Figuur 5-1. Hierdoor kan voor de drie verschillende debieten de situatie zonder én met

koelwateronttrekking worden gesimuleerd. De Amercentrale is bovendien verantwoordelijk voor een tweede koelwateronttrekking die even groot is als de eerste; deze onttrekking is echter gesitueerd benedenstrooms van de modelrand en wordt derhalve niet meegenomen. Lozing van gebruikt koelwater vindt eveneens benedenstrooms van de modelrand plaats.

De rivier de Donge is verantwoordelijk voor een klein inkomend debiet ter plaatse van de monding van de Amerhaven: ongeveer  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dit is zeer klein ten opzichte van zowel de rivierafvoer als de koelwateronttrekking, zodat de afvoer van de Donge mag worden verwaarloosd. Op circa 700 m van de monding is in het rekenmodel de Donge dan ook afgesloten. Weliswaar moet worden bedacht dat bovenstrooms van dit punt een derde koelwateronttrekking plaatsvindt ten behoeve van de Dongecentrale (jaarlijks circa  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  gedurende een half jaar), maar dit debiet wordt goeddeels onttrokken via het benedenstrooms gelegen Wilhelminakanaal, zie Figuur A-5 in bijlage A. Op de Dongemonding heeft deze onttrekking hoegenaamd geen invloed.

Om de verspreiding van slib in het gebied van de havenmondning te onderzoeken wordt in alle gevallen aan de bovenstroomse rand bij Keizersveer een eenheidsconcentratie slib opgelegd van  $1 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Deze slibhoeveelheid verspreidt zich door het domein via een advectie-diffusiemodel en een slibbezinkingsformule volgens Krone-Partheniades. Turbulente diffusie en horizontale dispersie wordt in rekening gebracht via een Elder's term ( $K = 0,15u*d$ ). Er is voor gekozen om in de verkennende berekeningen geen zandtransport mee te nemen. Ook wordt alleen het initiële sedimentatiepatroon in aanmerking genomen, zonder terugkoppeling van de veranderende morfologie naar de waterbeweging.

Voor alle gevallen bedraagt de simulatieduur 50 uur, met een tijdstap van 5 seconden (36000 tijdseenheden). Dit is afdoende voor de ontwikkeling van een stationaire waterbeweging en de verspreiding van slib door het gehele domein.

## 5.4 Overzicht van de gesimuleerde gevallen

Voor drie verschillende debieten is de stromingssituatie zonder én met koelwateronttrekking gesimuleerd, dus zes verschillende gevallen. Elk van deze gevallen is gesimuleerd voor,

- de nulsituatie, de huidige situatie,
- ingreep #1, een vernauwing van de ingang van de Amerhaven,
- ingreep #2, de aanleg van een nevengeul van de Bergsche Maas naar de Donge via het doorgraven van de Nieuwe Dombosch,
- de combinatie van beide ingrepen #1 en #2.

In totaal zijn dus 24 verschillende gevallen doorgerekend. Deze zijn als volgt genummerd, met  $Q_{\text{rivier}}$  als debiet op de bovenrand van het model en  $h_{\text{rivier}}$  als benedenrand:

Nulsituatie:

- Geval 01:  $Q_{\text{rivier}} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 0,40 \text{ m} + \text{NAP}$ , geen koelwaterinname
- Geval 02:  $Q_{\text{rivier}} = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 0,60 \text{ m} + \text{NAP}$ , geen koelwaterinname
- Geval 03:  $Q_{\text{rivier}} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 1,20 \text{ m} + \text{NAP}$ , geen koelwaterinname
- Geval 04:  $Q_{\text{rivier}} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 0,40 \text{ m} + \text{NAP}$ , koelwaterinname  $30 \text{ m}^3/\text{s}$
- Geval 05:  $Q_{\text{rivier}} = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 0,60 \text{ m} + \text{NAP}$ , koelwaterinname  $30 \text{ m}^3/\text{s}$
- Geval 06:  $Q_{\text{rivier}} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 1,20 \text{ m} + \text{NAP}$ , koelwaterinname  $30 \text{ m}^3/\text{s}$

Situatie met ingreep #1 (vernauwing haveningang):

- Geval 11:  $Q_{\text{rivier}} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 0,40 \text{ m} + \text{NAP}$ , geen koelwaterinname
- Geval 12:  $Q_{\text{rivier}} = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 0,60 \text{ m} + \text{NAP}$ , geen koelwaterinname
- Geval 13:  $Q_{\text{rivier}} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 1,20 \text{ m} + \text{NAP}$ , geen koelwaterinname
- Geval 14:  $Q_{\text{rivier}} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 0,40 \text{ m} + \text{NAP}$ , koelwaterinname  $30 \text{ m}^3/\text{s}$
- Geval 15:  $Q_{\text{rivier}} = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 0,60 \text{ m} + \text{NAP}$ , koelwaterinname  $30 \text{ m}^3/\text{s}$
- Geval 16:  $Q_{\text{rivier}} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 1,20 \text{ m} + \text{NAP}$ , koelwaterinname  $30 \text{ m}^3/\text{s}$

Situatie met ingreep #2 (nevengemaal):

- Geval 21:  $Q_{\text{rivier}} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 0,40 \text{ m} + \text{NAP}$ , geen koelwaterinname
- Geval 22:  $Q_{\text{rivier}} = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 0,60 \text{ m} + \text{NAP}$ , geen koelwaterinname
- Geval 23:  $Q_{\text{rivier}} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 1,20 \text{ m} + \text{NAP}$ , geen koelwaterinname
- Geval 24:  $Q_{\text{rivier}} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 0,40 \text{ m} + \text{NAP}$ , koelwaterinname  $30 \text{ m}^3/\text{s}$
- Geval 25:  $Q_{\text{rivier}} = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 0,60 \text{ m} + \text{NAP}$ , koelwaterinname  $30 \text{ m}^3/\text{s}$
- Geval 26:  $Q_{\text{rivier}} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 1,20 \text{ m} + \text{NAP}$ , koelwaterinname  $30 \text{ m}^3/\text{s}$

Situatie met beide ingrepen gecombineerd:

- Geval 31:  $Q_{\text{rivier}} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 0,40 \text{ m} + \text{NAP}$ , geen koelwaterinname
- Geval 32:  $Q_{\text{rivier}} = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 0,60 \text{ m} + \text{NAP}$ , geen koelwaterinname
- Geval 33:  $Q_{\text{rivier}} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 1,20 \text{ m} + \text{NAP}$ , geen koelwaterinname
- Geval 34:  $Q_{\text{rivier}} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 0,40 \text{ m} + \text{NAP}$ , koelwaterinname  $30 \text{ m}^3/\text{s}$
- Geval 35:  $Q_{\text{rivier}} = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 0,60 \text{ m} + \text{NAP}$ , koelwaterinname  $30 \text{ m}^3/\text{s}$
- Geval 36:  $Q_{\text{rivier}} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_{\text{rivier}} = 1,20 \text{ m} + \text{NAP}$ , koelwaterinname  $30 \text{ m}^3/\text{s}$

## 5.5 Resultaten voor de nulsituatie (gevallen 01-06)

In Figuur 5-3 t/m Figuur 5-6 zijn voor de zes basisgevallen de volgende resultaten getoond:

- Figuur 5-3: Details van de bodemligging en het snelheidsveld in de havenmond;
  - Figuur 5-4: De absolute grootte van de stroomsnelheid in [m/s];
  - Figuur 5-5: Diepte-gemiddelde slibconcentratie [in  $\text{kg}/\text{m}^3$ ];
  - Figuur 5-6: Initieel slibbezinkingspatroon na 50 uur [laagdikte in m].

Alle getoonde figuren zijn stationaire momentopnamen op het tijdstip  $T = 50$  uur. Er wordt gebruik gemaakt van contourplots en vectorplots. De gebruikte assen zijn x- en y-coördinaten van het Rijksdriehoekennet (in kilometers). Alleen het riviergedeelte rondom de haven is getoond; het gedeelte rond Keizersveer is voor het onderzoek niet van belang. De waterstanden zijn na 50 uur ruimschoots stationair. Het berekende waterstandsverhang is circa  $10^{-5}$ . Het gemiddelde bodemverhang tussen Keizersveer en het Spijkerboor is volgens de gebruikte (recente) dieptepeilingen nagenoeg nihil. De Bergsche Maas behoort dus typisch tot het benedenrivierengebied.

De snelheden in de rivier (Figuur 5-3) zijn eveneens klein te noemen:

- Gevallen 1 en 4:  $U \gg 0,1 \text{ m/s}$
- Gevallen 2 en 5:  $U \gg 0,2 \text{ m/s}$
- Gevallen 3 en 6:  $U \gg 1,0 \text{ m/s}$  (hoogwatersituatie)

In de gevallen 1 t/m 3 (zonder koelwaterinname) treedt een fraaie stationaire neer op in de Amerhavenmond, op de driesprong met de Donge. In de gevallen 1 en 2 is de hoogste snelheid in deze neer slechts ongeveer  $0,05 \text{ m/s}$ ; in geval 3 (hoogwater op de rivier) kan deze oplopen

tot circa 0,25 m/s (Figuur 5-3 linker kolom). Ook kan bij dit geval een secundaire neer worden waargenomen in de Dongemonding.

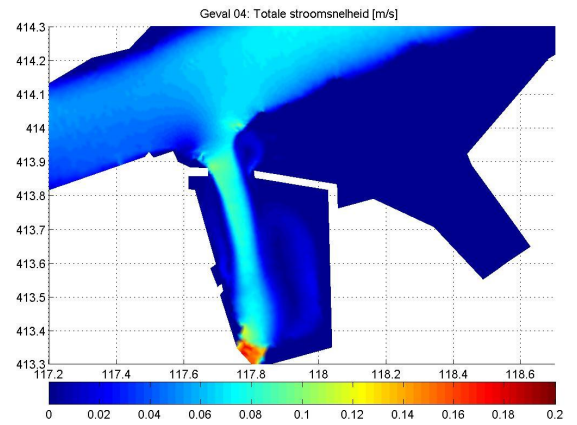
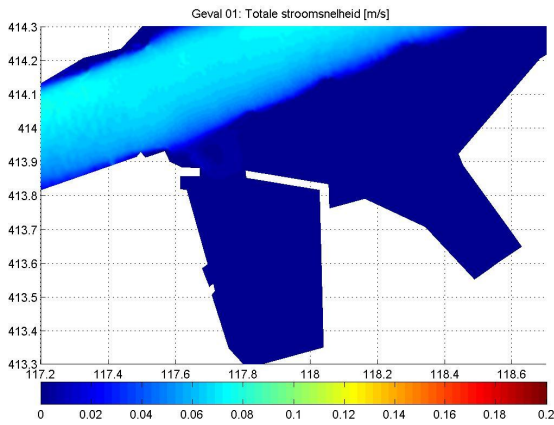
Wordt nu gekeken naar de waterbeweging in de gevallen 4 t/m 6 (met koelwaterinname, zie Figuur 5-3 rechter kolom), dan valt allereerst de dominantie op van de constante stroom van 30 m<sup>3</sup>/s water die door de monding de haven binnenkomt. In de gevallen 4 en 5 (laagwater en gemiddeld water op de rivier) vormt deze stroom een tamelijk stabiele "jet" in het havenbekken, die min of meer intact blijft. In deze gevallen wordt de neer in de havenmond onderdrukt, terwijl in het havenbekken juist twee stationaire neren ontstaan, aangedreven door de jet. In het geval 6, bij hogere afvoeren, is het opvallend dat de neer in de havenmond terugkeert. De koelwater-jet heeft in deze gevallen de neiging om in de havenmond "uit de bocht te schieten", waardoor er ruimte is voor de aandrijving van een neer. De aandrijvende kracht is aanzienlijk, hetgeen mag blijken uit het feit dat de neersnelheden bij geval 6 ruwweg dubbel zo groot zijn als in geval 3. Tevens ontstaat er een secundaire neer in de Donge. In het havenbekken zelf wordt de jet instabiel en deze draagt hier bij aan de turbulente wervelvorming. Opvallend is dat de hoofdstroom in het havenbekken gedurende een groot deel van de tijd een grote bocht maakt langs de oostoever van de haven, zodat de grootste neer westelijk van de jet optreedt (anders dan in de gevallen 4 en 5). De stroomsnelheden in de havenneer bereiken een waarde van rond de 0,1 m/s.

Opvallend aan de waterbeweging is tenslotte het kleine gebied met relatief hoge snelheden ter plaatse van de buitenzijde van het westelijke havenhoofd (Figuur 5-4). Hier is sprake van een ondiepe zone (diepte < 0,5 m) met relatief hoge ruwheid (vegetatie), maar wel precies op het stuwpunt van de turbulente menglaag t.p.v. de haveningang. Te zien is dat op deze ondiepte het water meestroomt met de ontstane neer c.q. de koelwaterjet. Dit is overigens alleen het geval bij hoogwater op de rivier (de gevallen 3 en 6).

Het waterbewegingspatroon heeft een directe gevolg voor de verspreiding van slib (zie Figuur 5-5) en het bezinken ervan (Figuur 5-6). In de gevallen 1, 2 en 3 is te zien dat de neer in de havenmond weliswaar (weinig) slib met zich meevoert, maar van een significante uitwisseling met het havenbekken is geen sprake (slechts in geval 3 is enige slibinname zichtbaar). In de neer kan wel slib bezinken wegens de snelheden die daar ten opzichte van de rivier laag zijn. In het havenbekken zelf zal echter niet of nauwelijks aanslibbing optreden.

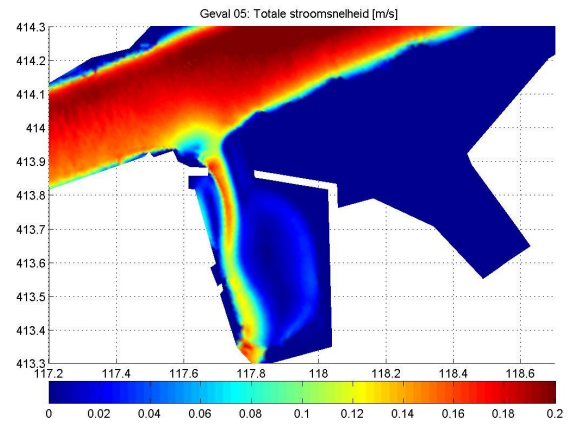
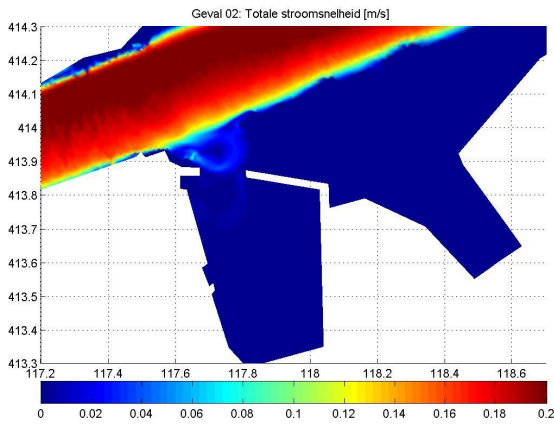
In de gevallen 4, 5 en 6, zie Figuur 5-5, is het beeld radicaal verschillend. Zoals verwacht mag worden, is de koelwaterjet van 30 m<sup>3</sup>/s verantwoordelijk voor een navenant grote inname van slib in het havenbekken. Dit is duidelijk zichtbaar in de gevallen 4, 5 en 6. Daarnaast is de inname van slib in de haven evenredig met de afvoer op de rivier, aangezien deze de evenwichtsconcentratie slib in het water bepaalt. In de gevallen 4 en 5 blijft de jet stabiel, en daarmee krijgt het slib weinig kans om zich in de haven te verspreiden; het komt voor bijna 100% in het koelwatersysteem van de Amercentrale terecht. Geval 6 daarentegen toont een significante menging van slib in het havenbekken als gevolg van grootschalige wervels. Door deze menging kan slib bezinken in de gehele haven. In geval 6 treedt dan ook de grootste aanslibbing op in het havenbekken (en in de Dongemonding). Dit resultaat is in overeenstemming met de observatie van Essent, dat tijdens hoogwaters de aanslibbing voor de Amercentrale het meest problematisch is.





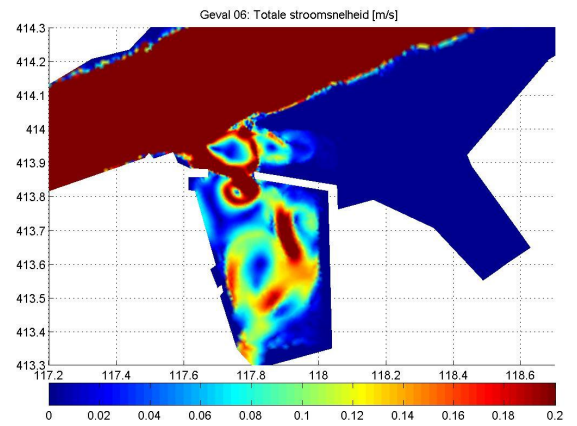
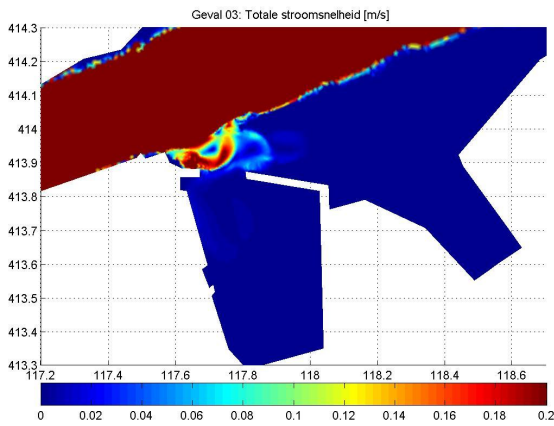
Geval 1: rivierafvoer 100 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

Geval 4: rivierafvoer 100 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s



Geval 2: rivierafvoer 300 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

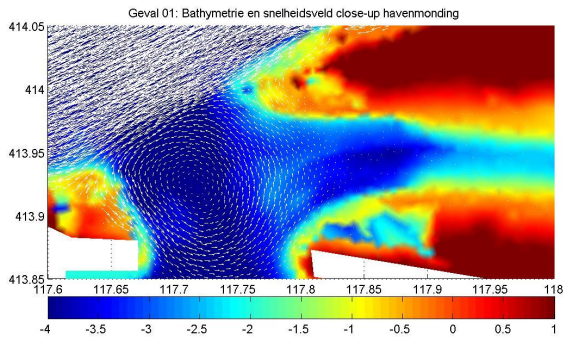
Geval 5: rivierafvoer 300 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s



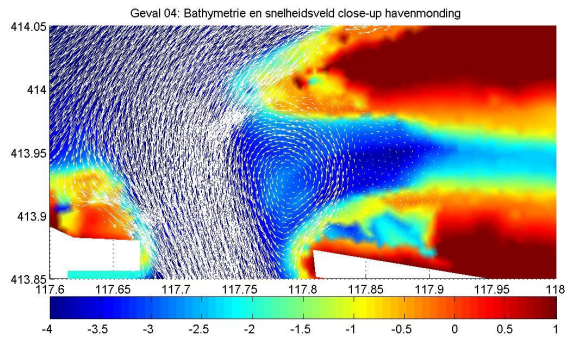
Geval 3: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

Geval 6: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s

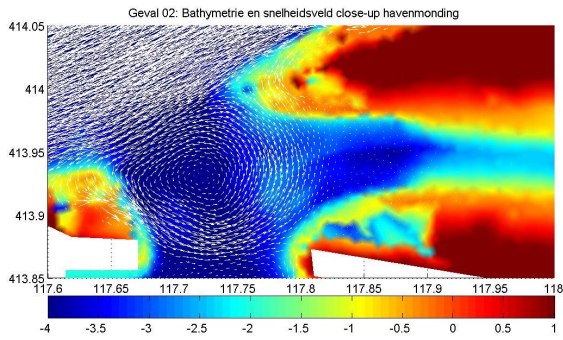
Figuur 5-3 Berekende stroomsnelheden [m/s] met FINEL2D



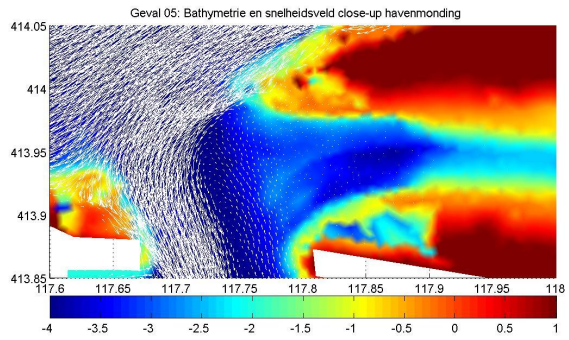
Geval 1: rivierafvoer 100 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s



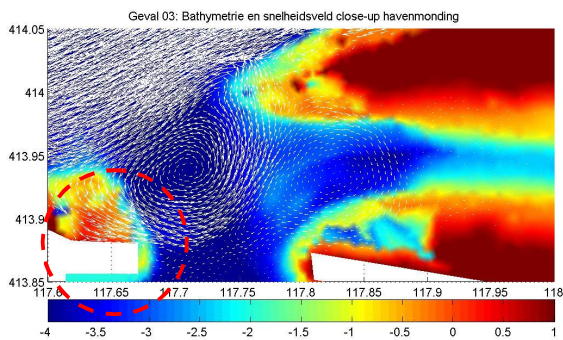
Geval 4: rivierafvoer 100 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s



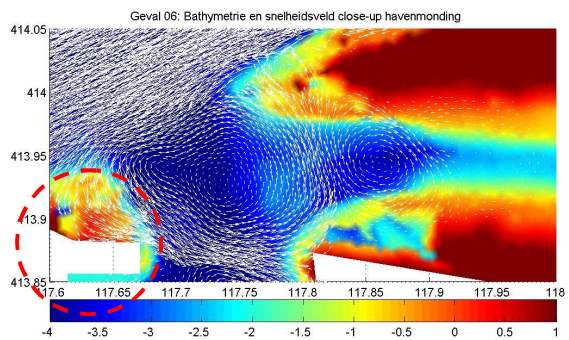
Geval 2: rivierafvoer 300 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s



Geval 5: rivierafvoer 300 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s

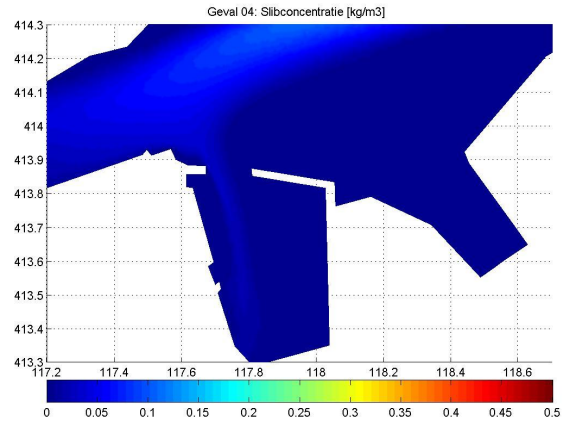
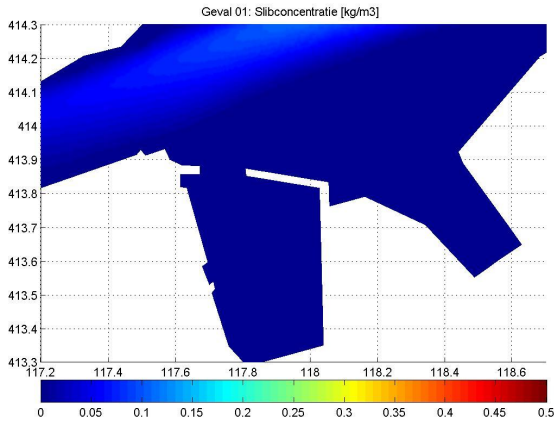


Geval 3: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s



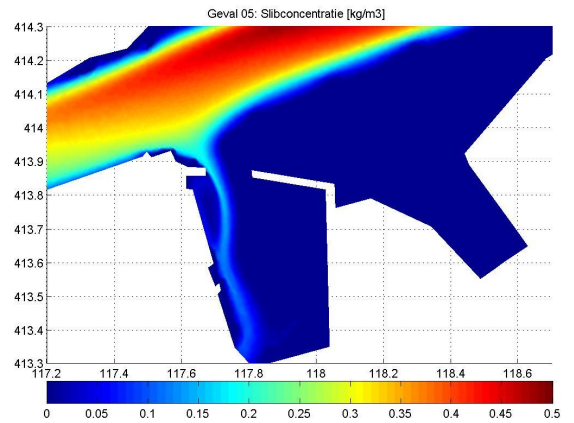
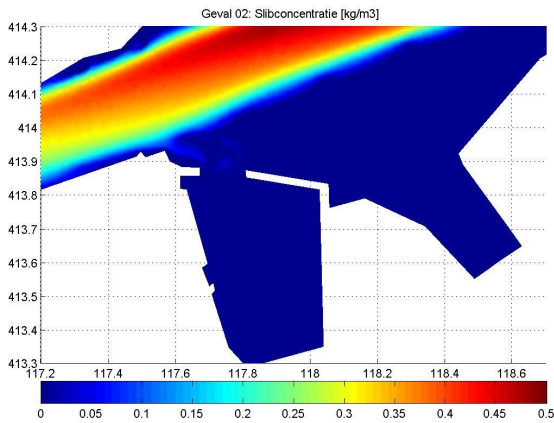
Geval 6: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s

Figuur 5-4 Bodemniveau [m+NAP] en stroomsnelheidsvectoren in en rondom de havenmondning



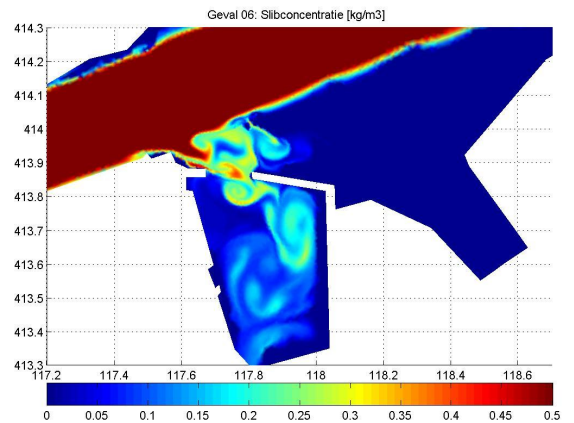
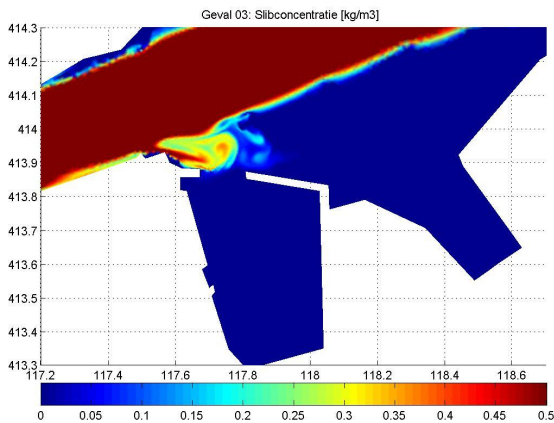
Geval 1: rivierafvoer 100 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

Geval 4: rivierafvoer 100 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s



Geval 2: rivierafvoer 300 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

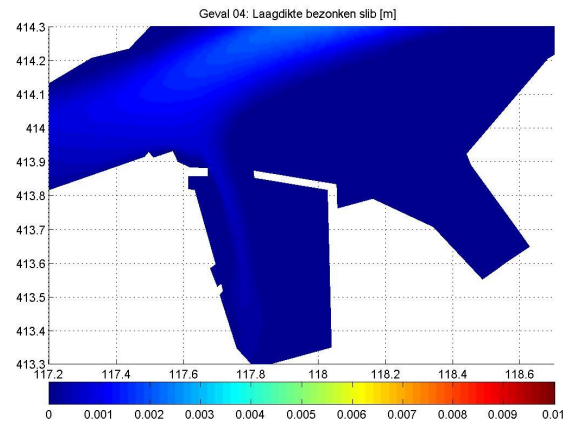
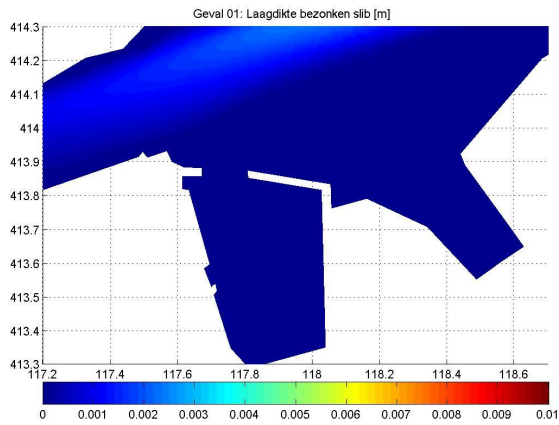
Geval 5: rivierafvoer 300 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s



Geval 3: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

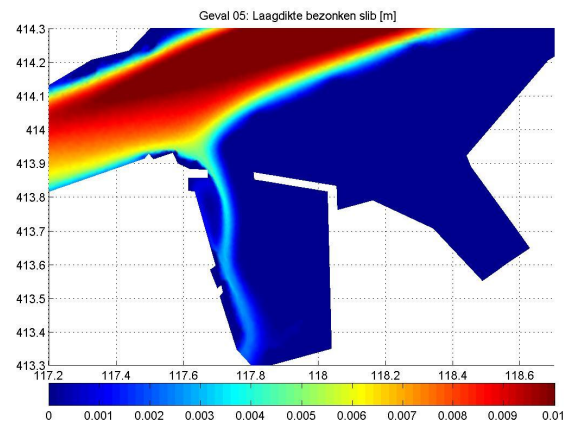
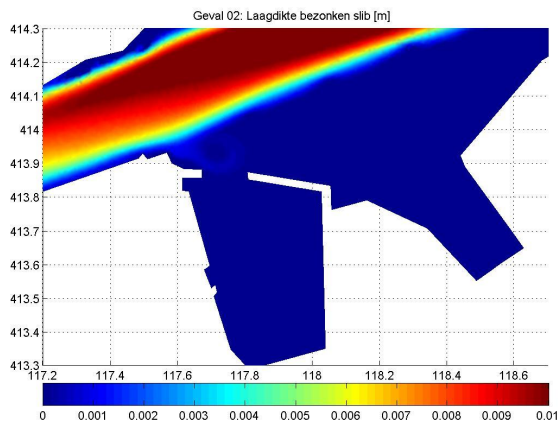
Geval 6: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s

Figuur 5-5 Berekende slibconcentraties [kg/m<sup>3</sup>]



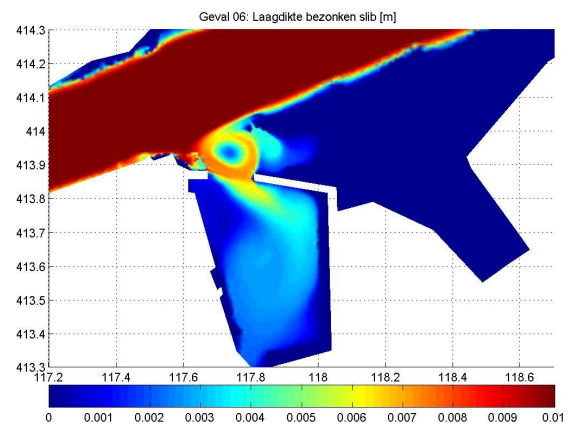
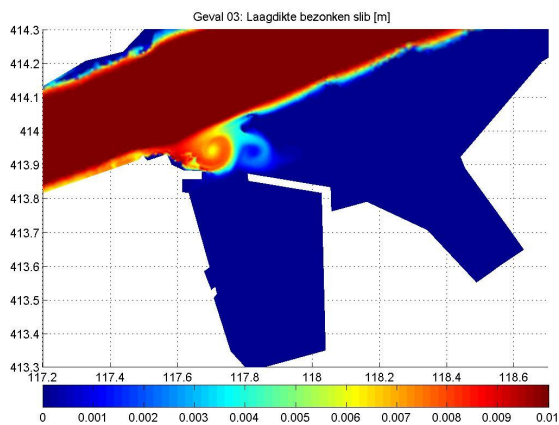
Geval 1: rivierafvoer 100 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

Geval 4: rivierafvoer 100 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s



Geval 2: rivierafvoer 300 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

Geval 5: rivierafvoer 300 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s



Geval 3: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

Geval 6: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s

Figuur 5-6 Berekend initieel slibbezinkingspatroon na 50 uur [laagdikte in m]

Tekenend voor de verschillen is een onderlinge vergelijking van de tijdsgemiddelde uitwisseling van water en sediment in de havenmondning. (Het vermelde percentage bij  $Q_{\text{netto}}$  geeft de totale tijdsgemiddelde wateruitwisseling als fractie van het totale rivierdebiet; het percentage bij  $S_{\text{netto}}$  geeft de tijdsgemiddelde netto inname van sediment als fractie van de totale sedimentvracht in de rivier.)

Uitwisseling water (Q) t.p.v. Ingang Amerhaven:

Geval 01:  $Q_{\text{in}} = 0,4$  ,  $Q_{\text{uit}} = 0,4$  ,  $Q_{\text{netto}} = 0,00$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] (0,40%)

Geval 02:  $Q_{\text{in}} = 0,8$  ,  $Q_{\text{uit}} = 0,8$  ,  $Q_{\text{netto}} = 0,00$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] (0,27%)

Geval 03:  $Q_{\text{in}} = 1,7$  ,  $Q_{\text{uit}} = 1,7$  ,  $Q_{\text{netto}} = 0,00$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] (0,11%)

Geval 04:  $Q_{\text{in}} = 30,7$  ,  $Q_{\text{uit}} = 0,7$  ,  $Q_{\text{netto}} = 30,00$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] (0,70%)

Geval 05:  $Q_{\text{in}} = 32,5$  ,  $Q_{\text{uit}} = 2,5$  ,  $Q_{\text{netto}} = 30,00$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] (0,83%)

Geval 06:  $Q_{\text{in}} = 40,4$  ,  $Q_{\text{uit}} = 10,4$  ,  $Q_{\text{netto}} = 30,00$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] (0,69%)

Uitwisseling sediment (S) t.p.v. Ingang Amerhaven:

Geval 01:  $S_{\text{in}} = 0,00$  ,  $S_{\text{uit}} = 0,00$  ,  $S_{\text{netto}} = 0,00$  [ $\text{kg}/\text{s}$ ] (0,00%)

Geval 02:  $S_{\text{in}} = 0,002$  ,  $S_{\text{uit}} = 0,001$  ,  $S_{\text{netto}} = 0,001$  [ $\text{kg}/\text{s}$ ] (0,00%)

Geval 03:  $S_{\text{in}} = 0,03$  ,  $S_{\text{uit}} = 0,02$  ,  $S_{\text{netto}} = 0,01$  [ $\text{kg}/\text{s}$ ] (0,00%)

Geval 04:  $S_{\text{in}} = 0,53$  ,  $S_{\text{uit}} = 0,00$  ,  $S_{\text{netto}} = 0,53$  [ $\text{kg}/\text{s}$ ] (0,53%)

Geval 05:  $S_{\text{in}} = 3,54$  ,  $S_{\text{uit}} = 0,01$  ,  $S_{\text{netto}} = 3,53$  [ $\text{kg}/\text{s}$ ] (1,18%)

Geval 06:  $S_{\text{in}} = 11,12$  ,  $S_{\text{uit}} = 2,01$  ,  $S_{\text{netto}} = 9,11$  [ $\text{kg}/\text{s}$ ] (0,61%)

Door de aanwezigheid van een stationaire neer zal er in alle gevallen sprake zijn van enige wateruitwisseling en bijbehorende sedimentuitwisseling (behalve in geval 4, waarin geen neer aanwezig is). Het netto uitwisselingsdebiet is in de gevallen 4 t/m 6 uiteraard  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ . Te zien is dat de totale wateruitwisseling door de aanwezigheid van een koelwaterjet slechts beperkt toeneemt voor lage afvoeren; voor hoge afvoeren is de toename groter (van  $Q_{\text{uit}} = 1,7$  naar  $Q_{\text{uit}} = 10,4 \text{ m}^3/\text{s}$ , dan in de gevallen 3 en 6 onderling worden vergeleken).

Voor de uitwisseling van slib is het patroon totaal anders: de aanwezigheid van de koelwaterjet werkt hier als een "hefboom" waardoor de sedimentinname een aantal ordes groter wordt, dan in het geval zonder koelwaterinname. Opvallend hierbij is dat zowel de inname als de 'export' toenemen voor toenemende afvoer, evenals het residu (inport – export). In geval 6 is niet alleen de hoeveelheid in de haven geïmporteerd slib het grootst, maar ook de mate waarin dit slib in de haven bezinkt. In de gevallen 4 en 5 gaat namelijk bijna al het geïmporteerde slib linea recta het koelwatersysteem van de Amercentrale in, terwijl in bij geval 6 dit slib grotendeels in de haven achterblijft door menging en sedimentatie. Met name geval 6 toont dus aan wat voor groot effect de koelwaterinname heeft op de havenaanslibbing (vergelijk geval 6 met geval 3!).

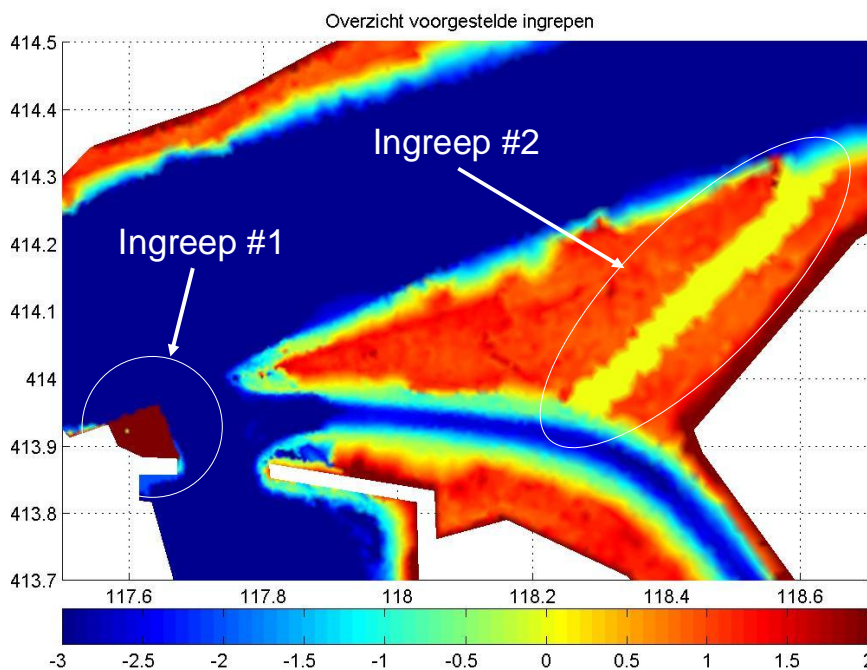
## 5.6 Conclusies op basis van de nulsituatie; oplossingsrichtingen

Uit de zes verkennende simulaties van de nulsituatie (01 t/m 06) valt op te maken dat de koelwaterinname van de Amercentrale het uitwisselingsgedrag van water en sediment in de havenmondning in hoge mate domineert. Het normaliter goed zichtbare effect van sedimentimport door grootschalige turbulente menglaagwervels in de havenmondning, dat bij veel andere rivierhavens onmiskenbaar aanwezig is, is bij de Amerhaven van ondergeschikt

belang. Het gegeven van het continue innamedebiet maakt dat de Amerhaven in feite functioneert als sedimentvang, met name bij hoge rivierafvoeren.

Indien slibtransport (of zandtransport in suspensie) beschouwd mag worden als de dominante factor in het sedimenttransport in het modelgebied, en als bovendien wordt aangenomen dat meegevoerd sediment zich mengt over de gehele waterverticaal, dan wordt geconcludeerd dat een harde constructie nabij de havenmondning (als pilot-project) geen effectieve ingreep zal zijn tegen het sedimentatieprobleem, althans zolang het koelwaterinnamepunt aanwezig blijft in de haven.

Een mogelijk betere oplossingsrichting is het aanpassen van de geometrie zodanig dat het water dat door de Amercentrale wordt aangezogen relatief arm aan sediment is. Dit is mogelijk indien het "sedimentvang"-effect kan worden verplaatst naar een gebied buiten de haven. Een belangrijke randvoorwaarde voor de implementeerbaarheid van een dergelijke ingreep in FINEL2D is, dat de door deze ingreep opgewekte stromingsverandering tweedimensionaal van karakter moet zijn (dus bijv. geen spiraalstroming). M.a.w. de aanpassing van de geometrie moet plaatsvinden over de gehele verticaal.



Figuur 5-7 De twee voorgestelde ingrepen in de geometrie

Binnen het projectteam is op advies van HKV en Struiksma Engineering een tweetal ingrepen geselecteerd voor implementatie in FINEL. In Figuur 5-7 is de bodemaanpassing van beide ingrepen aangegeven.

Ingrep #1 behelst het versmallen van de haveningang aan de benedenstroomse zijde. De ondiepe hoek tussen de benedenstroomse haveningang en de oever van de Amer wordt opgehoogd tot boven hoogwaterniveau. De gedachte achter deze ingreep is dat hiermee mogelijk de neer in de havenmondning kan worden onderdrukt, zodat de uitwisseling van water en sediment (anders dan door de koelwaterinname) wordt gereduceerd. Deze maatregel is dus vooral effectief indien men het koelwaterinnamepunt wegdenkt.

Ingrep #2 behelst de aanleg van een nevengeul van de Bergsche Maas naar de Donge door middel van het doorgraven van de Nieuwe Dombosch. De nevengeul is 50 m breed en heeft een bodemligging op NAP, zodat ook bij laagwater de geul nat is. Echter pas bij hoogwater wordt het debiet door de geul significant (omstreeks  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ ). De gedachte achter deze ingrep is dat de benedenloop van de Donge kan worden gebruikt als sedimentvang, indien hier via de nevengeul een zeker debiet doorheen getrokken wordt. Vervolgens wordt in de Dongemonding dus relatief sedimentarm water aangeboden bij de havenmond, zodat de koelwaterjet de haven in mogelijk ook armer aan sediment zal zijn. Tevens kan de nevengeul invloed uitoefenen op de neer in de havenmond.

In de hiernavolgende paragrafen wordt het effect beschreven op waterbeweging en sedimenttransport van elke ingrep afzonderlijk én van de combinatie van beide ingrepen.

## 5.7 Resultaten voor ingrep #1 (gevallen 11-16)

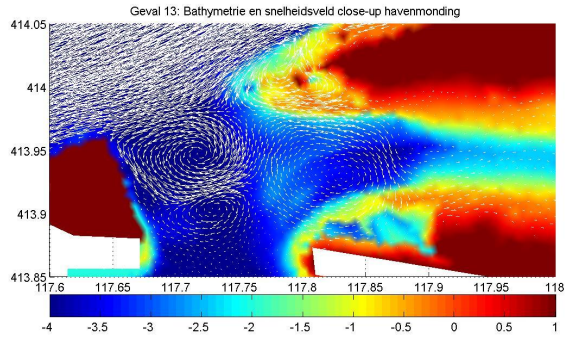
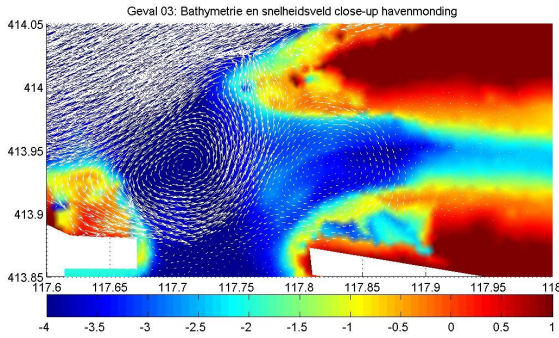
In Figuur 5-8 en Figuur 5-9 zijn voor de gevallen 11-16 de resultaten weergegeven bij een hoog rivierdebiet van  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ingrep #1, versmallen haveningang, is geïmplementeerd. In deze paragraaf worden echter alleen de meest relevante uitkomsten getoond, die in voldoende mate verschillen van de nulsituatie.

De uitkomsten van de gevallen 11, 12, 14 en 15 verschillen niet of nauwelijks van die van 01, 02, 04 en 05. Voor de gevallen 11 en 12 geldt dat de stationaire neer t.o.v. geval 01 en 02 licht verkleint door de versmalling van de haveningang. De snelheden in de neer nemen daardoor licht toe. De gevallen 14 en 15 kennen geen stationaire neer en deze gevallen verschillen voor wat betreft waterbeweging en sedimenttransport in het geheel niet van de gevallen 04 en 05.

Geval 13, Figuur 5-8, vertoont t.o.v. geval 3 een aanzienlijke verkleining van de neer in de havenmond. De snelheden in de neer nemen met ca. 20% toe tot ca.  $0,30 \text{ m/s}$ . Hierdoor wordt ook de secundaire neer in de mond van de Donge versterkt. Deze neer wordt bovendien rijker aan sedimentinhoud; de sedimentinhoud van de primaire neer in de havenmond blijft ongeveer constant. Door de toegenomen stroomsnelheden neemt de bezinking van slib in de havenmond licht af.

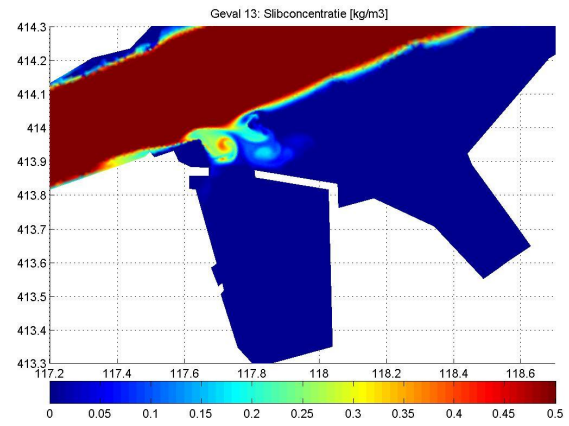
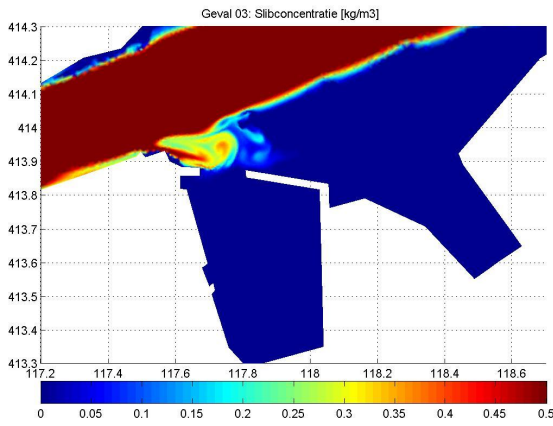
Geval 16, Figuur 5-9, vertoont ten opzichte van geval 06 soortgelijke verschillen. De primaire neer wordt echter niet kleiner maar blijft even groot, en neemt toe in intensiteit. De snelheden in de neer nemen toe van ca.  $0,40$  naar  $0,50 \text{ m/s}$ . De secundaire neer wordt licht versterkt. Doordat aan de benedenstroomse zijde van de haveningang de primaire neer het meest in een keurslijf gedwongen wordt, treden aldaar de hoogste stroomsnelheden op. Het blijkt verder dat door de krachtiger geworden neer de slibname in de haven vermindert, waardoor de initiële bezinking in het havenbekken met ca. 10-20% afneemt, met name ter plaatse van de koelwaterjet.

Al met al kan worden geconcludeerd dat ingrep #1, versmallen haveningang, vooral effect sorteert tijdens hoogwatersituaties. Hoewel het effect voor wat betreft de waterbeweging omgekeerd is ten opzichte van wat beoogd werd – een toename van de neerintensiteit in plaats van een afname – leidt dit toch tot een lichte reductie van de sedimentatie in zowel haven als havenmond, dus gunstig voor wat betreft de sedimentatiereductie.



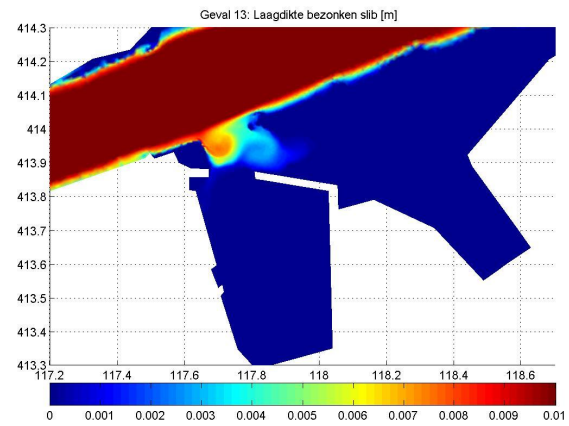
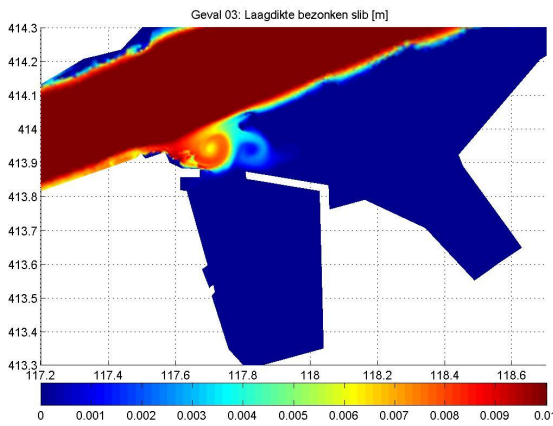
Geval 3: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

Geval 13: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s



Geval 3: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

Geval 13: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

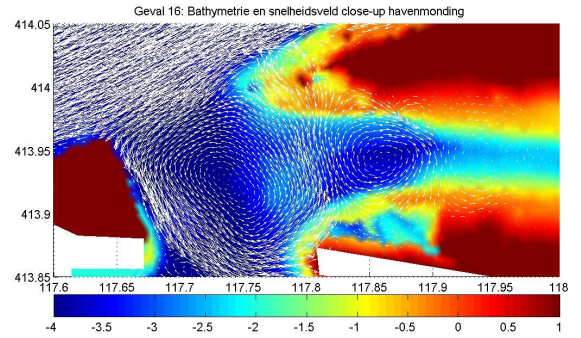
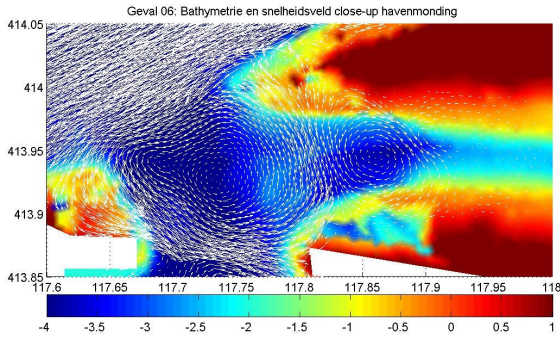


Geval 3: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

Geval 13: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

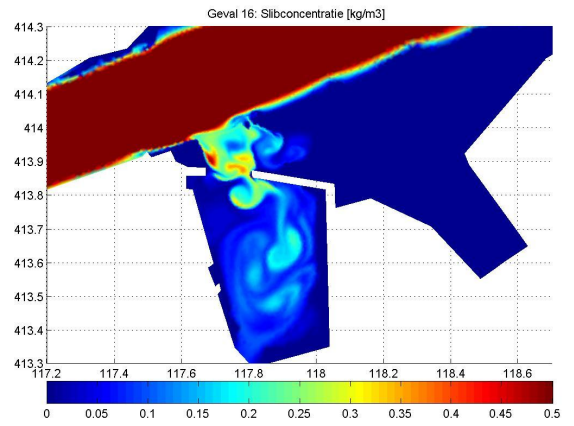
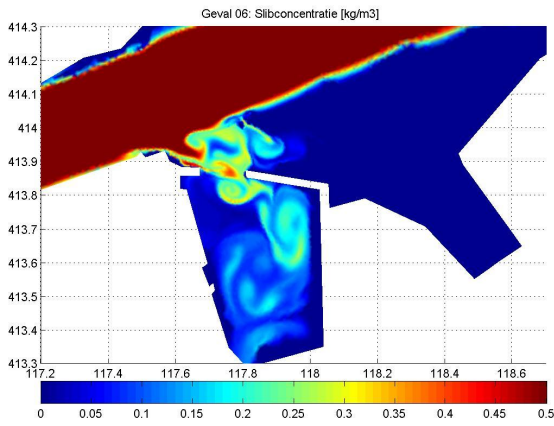
Figuur 5-8 Verschillen tussen geval 03 en geval 13 (ingreep #1): stroomsnelheid, slibconcentratie en sliblaagdikte





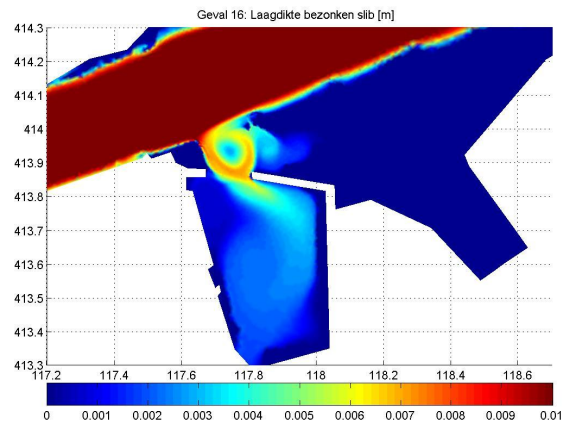
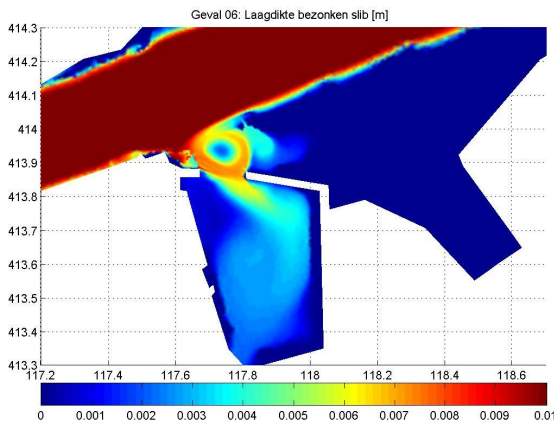
Geval 6: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s

Geval 16: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s



Geval 6: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s

Geval 16: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s



Geval 6: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s

Geval 16: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s

*Figuur 5-9* Verschillen tussen geval 06 en geval 16 (ingreep #1): stroomsnelheid, slibconcentratie en sliblaagdikte

## 5.8 Resultaten voor ingreep #2 (gevallen 21-26)

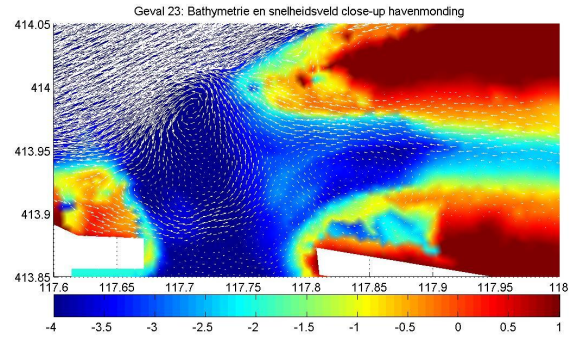
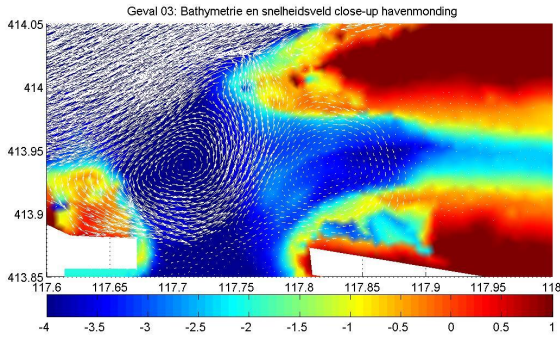
Ook met betrekking tot de effecten van ingreep #2, nevengeul door Nieuwe Dombosch, worden in deze paragraaf alleen de meest relevante uitkomsten getoond, die in voldoende mate verschillen van de nulsituatie.

Hoewel er reeds bij lage rivierafvoeren de nevengeul meestroomt, heeft deze in de gevallen 21, 22, 24 en 25 hoegenaamd geen effect op de stroming in de havenmond en het neerpatroon. In de gevallen 24 en 25 wordt de koelwaterjet (vergeleken met geval 04 en 05) door de stroming in de Donge zeer licht in westelijke richting gedrukt, maar dit heeft geen kwantitatieve gevolgen voor de stroomsnelheid, noch voor de slibdepositie. Evenals ingreep #1 heeft ingreep #2 slechts effect bij hoge rivierafvoeren.

In geval 23, Figuur 5-10, staat er in de nevengeul ongeveer 1,5 m water; het totaaldebiet in de nevengeul en de Donge is daarbij 9,5 m<sup>3</sup>/s. Het blijkt dat deze afvoer ter plaatse van de Dongemonding de primaire neer uit geval 03 effectief onderdrukt. De neer verschuift aanzienlijk naar het westen en de stroomsnelheden worden meer dan gehalveerd (tot 0,10 m/s). Dit kan worden verklaard uit het feit dat het debiet in de Dongemonding de snelheidsgradiënt ter plaatse van het bovenstroomse loslaatpunt sterk verkleint. Dit heeft tot gevolg dat er minder energie wordt overgedragen van de rivier naar de neer en overige turbulente wervels. Het onderdrukken van de neer leidt ertoe dat zowel de sedimentconcentratie als het initiële slibbezinkingspatroon in de havenmond reducties te zien geven van rond de 50%.

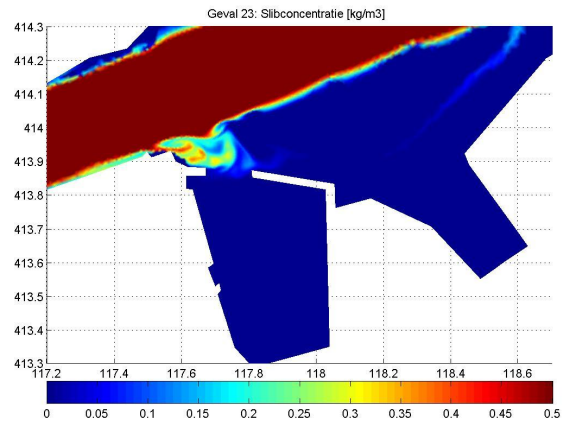
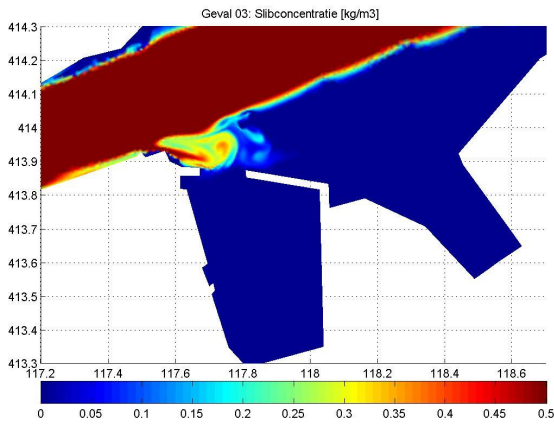
In het geval 26, Figuur 5-11, blijft de neer t.o.v. geval 06 op dezelfde plaats, maar door het debiet in de Donge (eveneens 9,5 m<sup>3</sup>/s) verzwakt de neer wel voor wat betreft de stroomsnelheid (met ongeveer 30%, tot 0,15 m/s). De secundaire neer in de Donge verdwijnt geheel als gevolg van datzelfde debiet. De hoeveelheid slib die door de havenmond in de Amerhaven worden geïmporteerd en daar bezinkt neemt met circa 15-20% af. Dit kan niet worden verklaard vanuit het verzwakken van de neer, omdat de hoeveelheid geïmporteerd water in de haven gelijk blijft, namelijk 30 m<sup>3</sup>/s. Het is echter aannemelijk dat aanzuiging van het relatief schone Dongewater hier een rol speelt. De combinatie Donge-nevengeul blijkt inderdaad als sedimentvang te fungeren, vooral de nevengeul zelf. In de Donge blijft relatief weinig sediment achter. Met name in de nevengeul zou op termijn enig noodzakelijk baggerwerk te verwachten zijn. Het schone Dongewater vermengt zich met de menglaag op de grens rivier-havenmond en verlaagt zo effectief de sedimentconcentraties in de neer en in de koelwaterjet.

Met betrekking tot ingreep #2, nevengeul door Nieuwe Dombosch, kan worden geconcludeerd dat het aanleggen van een nevengeul redelijk effectief is, met name in de situatie zonder koelwater, maar toch ook in de situatie waarbij koelwater onttrokken wordt. De neer wordt effectief verzwakt, zoals verwacht, en er komt relatief schoon water beschikbaar dat door de Amerhaven aangezogen kan worden. Het effect van ingreep #2 is alleen significant tijdens hoogwatersituaties, die een klein deel van het jaar voorkomen, maar wel dominant zijn voor de morfologische ontwikkelingen in het gebied.



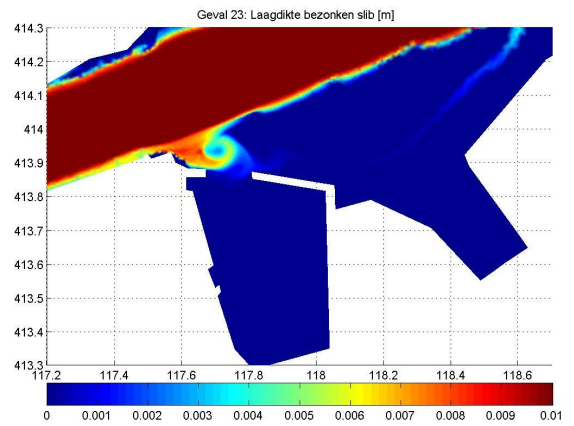
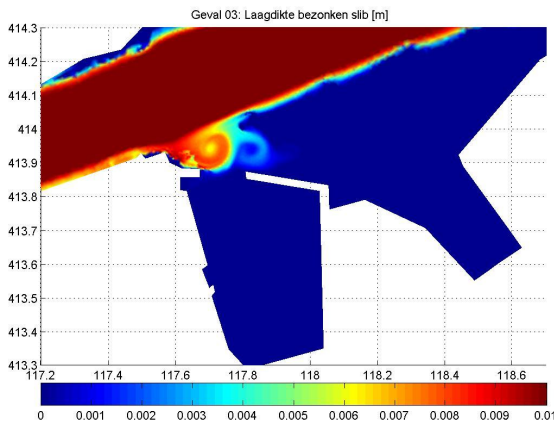
Geval 3: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

Geval 23: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s



Geval 3: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

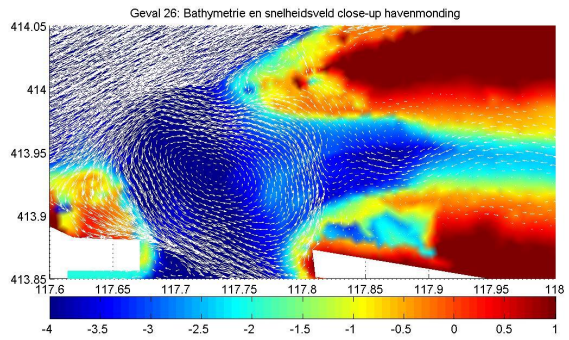
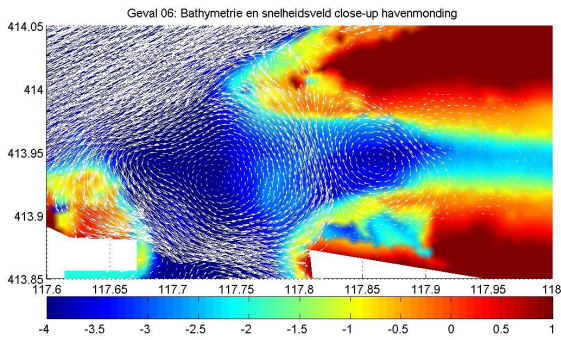
Geval 23: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s



Geval 3: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

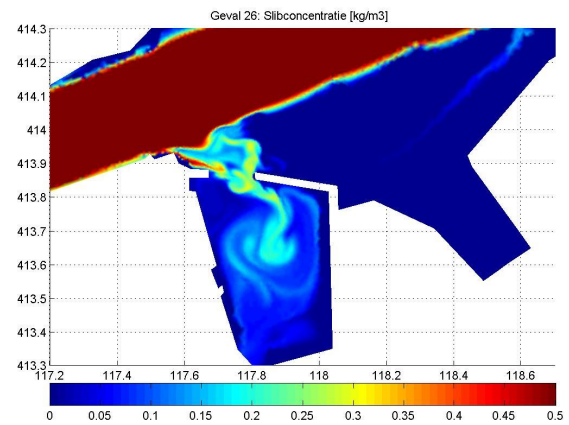
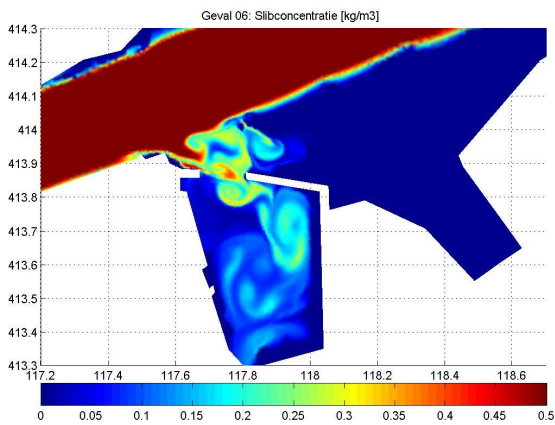
Geval 23: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

Figuur 5-10 Verschillen tussen geval 03 en geval 23 (ingreep #2): stroomsnelheid, slibconcentratie en sliblaagdikte



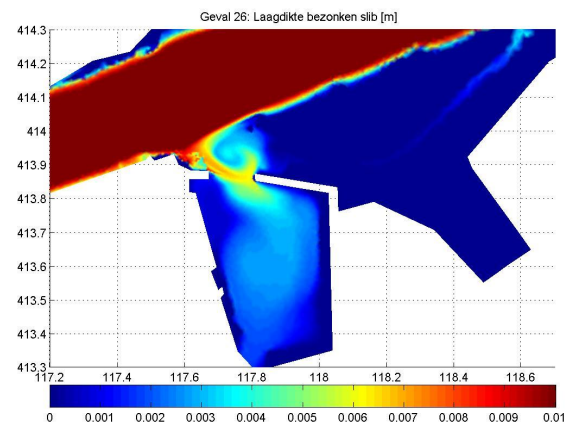
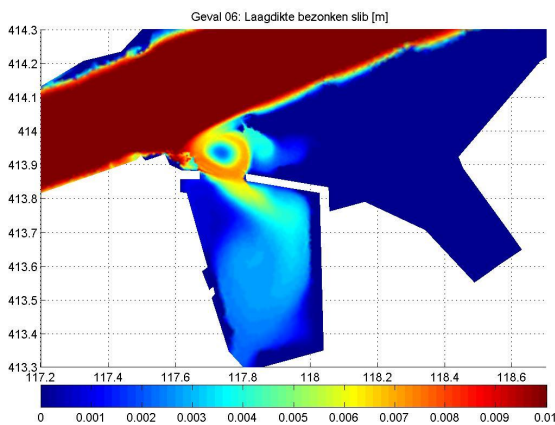
Geval 6: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s

Geval 26: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s



Geval 6: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s

Geval 26: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s



Geval 6: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s

Geval 26: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s

Figuur 5-11 Verschillen tussen geval 06 en geval 26 (ingreep #2): stroomsnelheid, slibconcentratie en sliblaagdikte

## 5.9 Resultaten voor ingrepen #1 en #2 gecombineerd (gevallen 31-36)

Ook voor de combinatie van beide ingrepen, versmallen haveningang en een nevengeul door de Nieuwe Dombosch, geldt dat deze alleen tot een significant effect leidt in geval van hoogwater. De laagwatergevallen 31 en 32 laten een klein resulterend cumulatief effect zien van beide ingrepen: de neer in de havenmondning wordt iets kleiner. De laagwatergevallen 34 en 35 laten net als de gevallen 24 en 25 een lichte verschuiving zien van de koelwaterjet in westelijke richting. Voor de rest zijn er geen noemenswaardige effecten te zien.

In het geval 33, Figuur 5-12, verdwijnt de neer in de havenmondning volledig door toedoen van zowel de versmalling als het debiet in de Donge. Ook nemen in de havenmondning de slibconcentraties en bezinkingshoeveelheden sterk af: een reducties van meer dan 75% worden gehaald.

De effecten bij geval 36, Figuur 5-13, zijn minder groot, hoewel nog steeds groter dan bij ingreep #1 en #2 afzonderlijk. De grote primaire neer blijft intact, maar wordt iets gecompriemd in oost-west-richting. Evenals bij geval 26 wordt de koelwaterjet gedeeltelijk gevoed vanuit de relatief sedimentarme Donge, zodat de slibconcentraties in de haven afnemen. De slibimport tussen de havenhoofden door wordt gereduceerd met ca. 30%, evenals de hoeveelheid slib die bezinkt.

De hoogwatergevallen 33 en 36 laten t.o.v. de gevallen 03 en 06 een lineaire combinatie zien van de effecten van ingreep #1 en #2 afzonderlijk. Beide ingrepen lijken elkaar dus te versterken, hetgeen uiteraard gunstig is.

Ten behoeve van het overzicht volgen onderstaand de netto waarden van de sedimentimport in de Amerhaven voor de acht hierboven besproken gevallen. Dit kan op twee manieren worden gemeten: ter plaatse van de menglaag op de grens rivier-neer (links) of tussen de havenhoofden (rechts).

Uitwisseling sediment (S) t.p.v. de menglaag (links) en ingang Amerhaven (rechts) en zonder koelwaterinname:

$$\text{Geval 03: } S_{\text{netto}} = 2,76 \text{ [kg/s]} \quad S_{\text{netto}} = 0,01 \text{ [kg/s]}$$

$$\text{Geval 13: } S_{\text{netto}} = 2,13 \text{ [kg/s]} \quad S_{\text{netto}} = 0,03 \text{ [kg/s]}$$

$$\text{Geval 23: } S_{\text{netto}} = 1,77 \text{ [kg/s]} \quad S_{\text{netto}} = 0,007 \text{ [kg/s]}$$

$$\text{Geval 33: } S_{\text{netto}} = 0,59 \text{ [kg/s]} \quad S_{\text{netto}} = 0,03 \text{ [kg/s]}$$

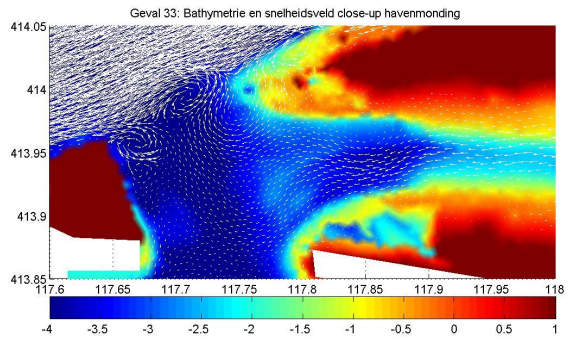
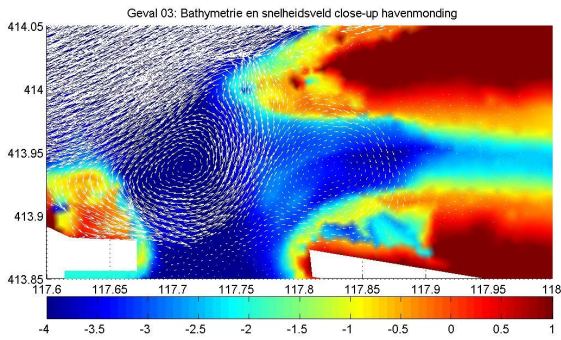
Uitwisseling sediment (S) t.p.v. de menglaag (links) en ingang Amerhaven (rechts) en met koelwaterinname:

$$\text{Geval 06: } S_{\text{netto}} = 12,63 \text{ [kg/s]} \quad S_{\text{netto}} = 9,11 \text{ [kg/s]}$$

$$\text{Geval 16: } S_{\text{netto}} = 11,37 \text{ [kg/s]} \quad S_{\text{netto}} = 7,86 \text{ [kg/s]}$$

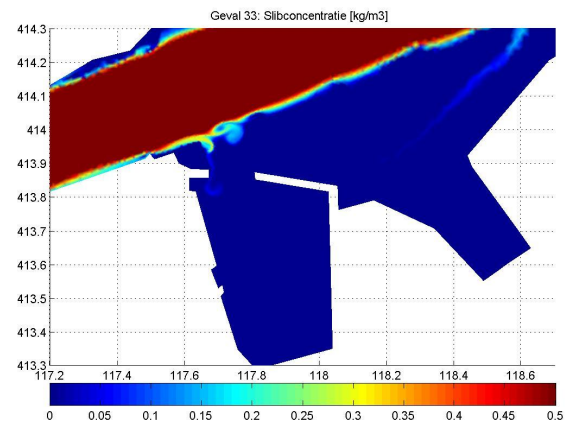
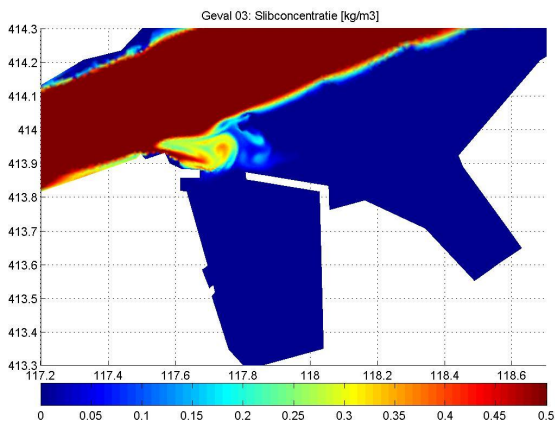
$$\text{Geval 26: } S_{\text{netto}} = 10,22 \text{ [kg/s]} \quad S_{\text{netto}} = 7,82 \text{ [kg/s]}$$

$$\text{Geval 36: } S_{\text{netto}} = 9,35 \text{ [kg/s]} \quad S_{\text{netto}} = 7,04 \text{ [kg/s]}$$



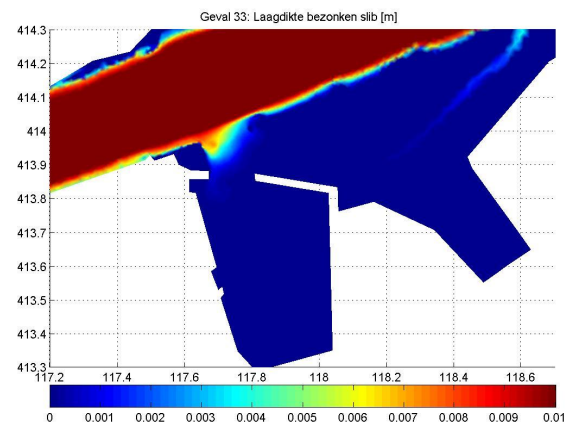
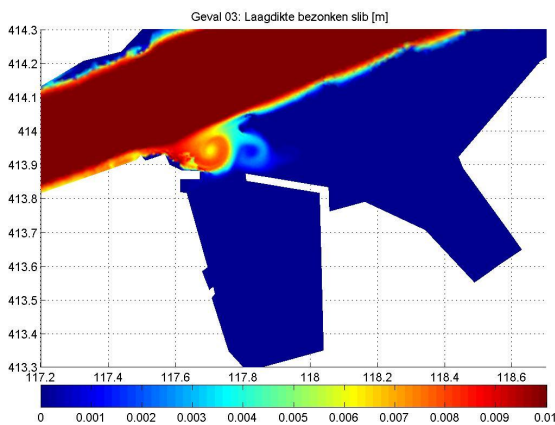
Geval 3: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

Geval 33: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s



Geval 3: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

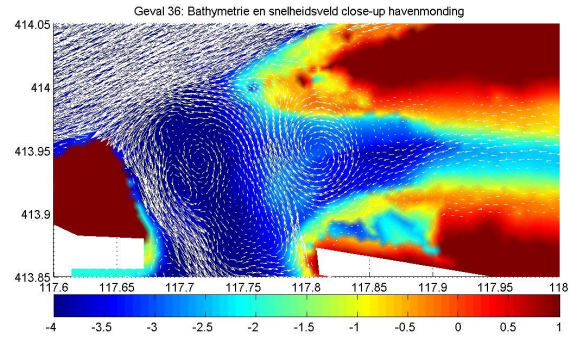
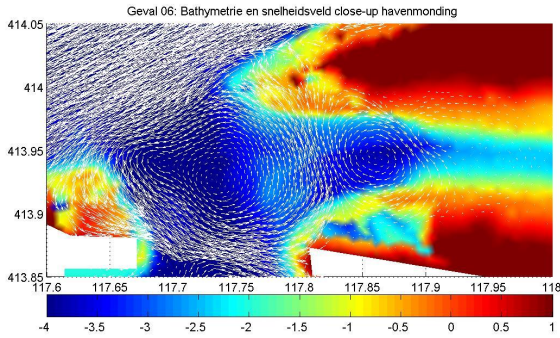
Geval 33: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s



Geval 3: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

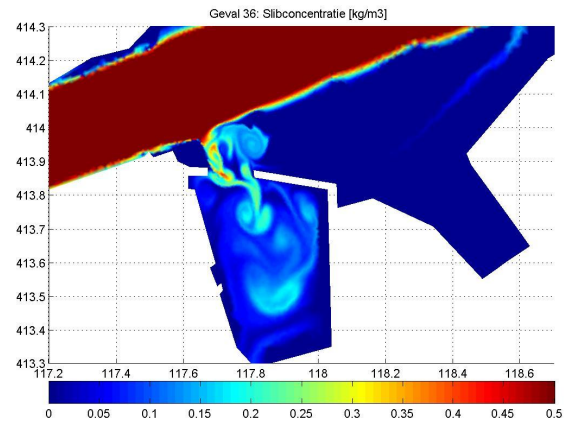
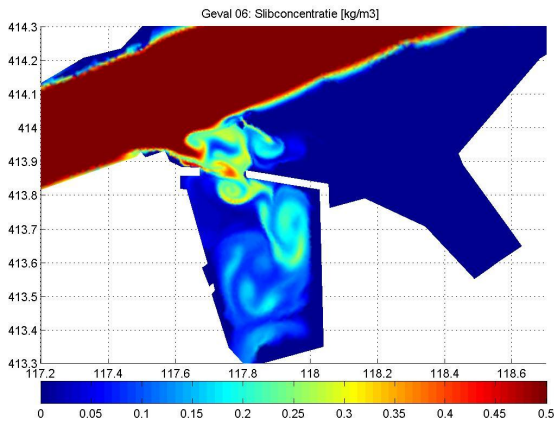
Geval 33: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

Figuur 5-12 Verschillen tussen geval 03 en geval 33 (ingreep #1 en #2 gecombineerd): stroomsnelheid, slibconcentratie en sliblaagdikte



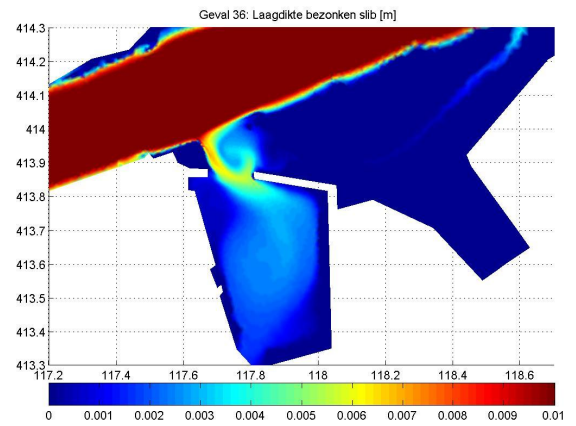
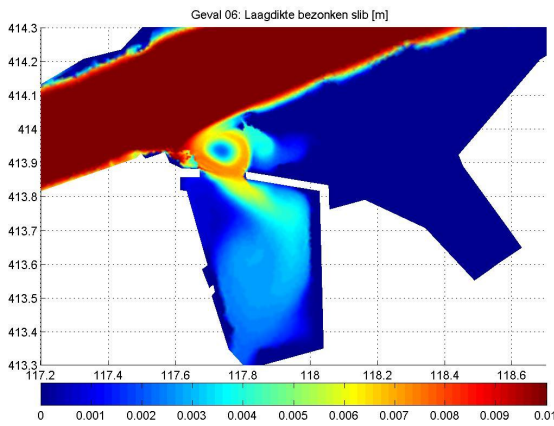
Geval 6: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s

Geval 36: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s



Geval 6: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s

Geval 36: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s



Geval 6: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s

Geval 36: rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s

Figuur 5-13 Verschillen tussen geval 06 en geval 36 (ingreep #1 en #2 gecombineerd): stroomsnelheid, slibconcentratie en sliblaagdikte

## 5.10 Algemene conclusies en aanbevelingen berekeningen

### Conclusies

Uit de bovenstaande paragrafen blijkt dat de twee voorstelde ingrepen en hun combinatie in zekere mate effectief zijn bij het reduceren van de sedimentatie in zowel de monding als het bekken van de Amerhaven. Hierbij kan worden opgemerkt dat de voorgestelde maatregelen doorgaans effectiever zijn in de situatie zónder koelwateronttrekking. Het harde feit van de inname van 30 m<sup>3</sup>/s koelwater maakt het zowel in theorie als praktijk moeilijk om de hoeveelheid ingenomen sediment rigoureus te reduceren.

De ten behoeve van deze simulaties voorgestelde maatregelen zijn tamelijk grootschalige ingrepen in de geometrie van de omgeving van de Amerhaven. Daarom zijn deze ingrepen tamelijk kostbaar vergeleken met een lokale harde constructie nabij de havenmonding. Het staat daarom, ondanks de hierboven aangetoonde effectiviteit, geenszins vast dat de hier gepresenteerde ingrepen het meest wenselijk zijn als pilot-project. In feite zijn ze voor een pilot-project iets te ingrijpend, vooral de aanleg van een nevengeul door een natuurgebied.

Omdat de simulatie van lokale harde constructies met een complex 3D-stromingspatroon echter buiten het bestek van dit project vallen, is besloten om zich t.b.v. deze simulaties te beperken tot 2D-ingrepen in de horizontale geometrie. Een harde constructie als pilot-project zal alleen zinvol zijn als het bovenste gedeelte van de waterverticaal nabij de havenmonding relatief sedimentarm is. In dat licht kan ingreep #2, die een nevengeul en de Dongemonding gebruikt als sedimentvang, een aansprekend alternatief zijn.

Tenslotte kan worden gesteld dat er een effectieve oplossing bestaat voor het sedimentatieprobleem in de Amerhaven: verplaatsing van het koelwaterinnamepunt van de haven naar de rivier. In dat geval wordt een situatie verkregen vergelijkbaar met geval 01 t/m 03. Een eventueel optredend sedimentatieprobleem komt daarin voornamelijk voor rekening van grootschalige turbulentie in de havenmonding; het negatieve effect van deze turbulentie zal echter veel beperkter zijn dan dat van de huidige koelwaterinname. In deze situatie zal een constructieve ingreep nabij de havenmonding ook daadwerkelijk effectief kunnen zijn.

### Aanbevelingen

De viscositeit bepaalt in sterke mate de afmetingen van de neren. Aangezien het een diepte-geïntegreerd stromingsmodel betreft, is de viscositeit in de verticaal ook geïntegreerd. In de literatuur zijn algemene formuleringen te vinden voor de viscositeit van een twee-dimensionaal diepte-geïntegreerd rekenmodel, maar de viscositeit wordt juist sterk beïnvloed door drie-dimensionale stromingspatronen zoals stromingsloslating, spiraalstroming en stroomversnelling en -vertraging. Voor deze lokale effecten is de geïntegreerde viscositeit op die locaties verschillend. De formulering van de viscositeit in een 2D-rekenmodel laat die details niet toe. In grote lijnen zal het berekende stroombeeld overeenkomen met metingen of met de verwachte werkelijkheid. Stromingsdetails van onder andere neren, stroming langs doorlatenden kribben en rond schermen wijkt af. In welke mate het rekenmodel 'er naast zit' is alleen met metingen uit de werkelijkheid te bepalen.

De keuze voor de viscositeit in de uitgevoerde berekeningen is gedaan op basis van expert judgement. De schaalmodelproeven die in het kader van dit onderzoek bij de TU Delft zijn uitgevoerd, zouden kunnen bijdragen aan de keuze van de viscositeit in dit FINEL2D-model. Een rekenmodel van het schaalmodel zou afgestemd kunnen worden op het gemeten stroomveld.



De proeven met de palenschermen in het schaalmodel kunnen meer inzicht geven in de benodigde (lokale) viscositeit die in het rekenmodel zou moeten worden opgegeven.

Bij WL|Delft Hydraulics is in het verleden uitgebreid onderzoek gedaan naar de wijze waarop in twee-dimensionale rekenmodellen palenrijen (doorlatende kribben) zouden moeten worden geschematiseerd. In Flokstra en Van Schijndel (2002) zijn de resultaten van een vergelijking van berekeningen en schaalmodelproeven opgenomen. Een methode om een palenrij in een twee-dimensionaal diepte-geïntegreerd rekenmodel te schematiseren, is het werken met een extra weerstand. Op de locatie van de palenrij wordt een extra weerstand in de vorm van een Chézy-coëfficiënt opgegeven. In formulevorm,

$$\frac{1}{C_t^2} = \frac{1}{C_b^2} + \frac{1}{C_k^2} + \frac{1}{C_p^2} \quad (5-1)$$

waarin:

- $C_t$  = resulterende Chézy-coëfficiënt van alle effecten [ $m^{1/2}/s$ ]
- $C_b$  = Chézy-coëfficiënt van de vlakke betonbodem (in proef  $k=0,0006$  m) [ $m^{1/2}/s$ ]
- $C_k$  = Chézy-coëfficiënt van energieverlies betonnen voet van hybride krib [ $m^{1/2}/s$ ]
- $C_p$  = Chézy-coëfficiënt afgeleid uit weerstand van de palenrij [ $m^{1/2}/s$ ]

Voor de uitwerking van de afzonderlijke bijdragen aan de Chézy-coëfficiënt wordt verwezen naar het rapport van Flokstra en Van Schijndel (2002) en bijbehorende aanvullende memo.



## 6 Keuze en uitwerking maatregelen

### 6.1 Algemeen

Na het inventariseren van maatregelen die mogelijk in aanmerking komen voor de beide havens om de sedimentatie te reduceren, is in dit hoofdstuk de keuze van geschikte maatregelen onderbouwd. Per haven zijn drie maatregelen geselecteerd waarvan het ontwerp verder is uitgewerkt.

### 6.2 Maatregelen industriehaven Amercentrale

#### 6.2.1 Onderbouwing keuze

Voor het verdere onderzoek komen bij voorkeur maatregelen in aanmerking waarvan het effect met een rekenmethode of een numeriek model kan worden onderzocht. Het effect moet dan niet zijn gebaseerd op drie-dimensionale stromingseffecten (spiraalstroming). De maatregelen die in aanmerking komen, zijn gekozen uit de opsomming in hoofdstuk 4, en zijn hieronder in volgorde van voorkeur gezet:

1. Versmallen van de havenmond. Het effect van het versmallen van de haveningang is eenvoudig met een numeriek 2D-model te onderzoeken.
2. Doorlaatbare kribben bovenstrooms van de haveningang, kunnen in een numeriek model als extra weerstand worden geschematiseerd. De manier van schematiseren is wellicht met de resultaten van het schaalmodel onderzoek van palenrijen (TUD, 2008) te onderbouwen. Voor doorlaatbare kribben zijn ontwerpregels beschikbaar. Deze maatregel is samen met de versmalling van de haveningang (1) te combineren. De verwachting is dat beide maatregelen samen het stroombeeld en de sedimentaanvoer voor de havenmond beperken.
3. Aanleg van een hoogwatergeul door de Nieuwe Dombosch (buitendijkse uiterwaard bovenstrooms van de Dongemonding. Een hoogwatergeul is eenvoudig in een numeriek 2D-model te onderzoeken.
4. Zandspiraalbuis. Het effect kan niet in een numeriek 2D-model worden onderzocht, maar voor het ontwerp van zandspiraalbuizen zijn ontwerpregels beschikbaar.
5. Drempel met scherm bovenstrooms van de haveningang. Een drempel, of meerdere drempels, en een parallel scherm veroorzaakt een drie-dimensionaal stroombeeld dat het sediment beter uit de haven houdt. Deze maatregel is alleen goed in een schaalmodel te onderzoeken, hetgeen voorlopig geen optie is.

De volgende maatregelen zijn verder uitgewerkt:

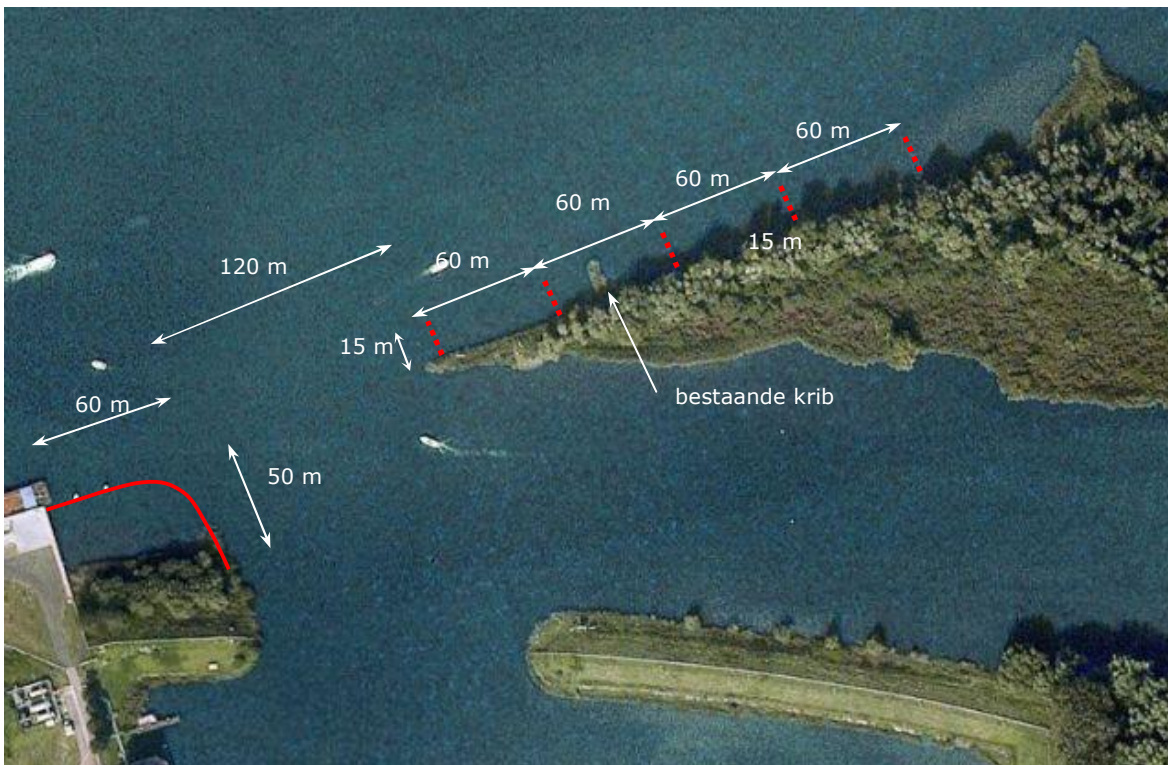
- (1) en (2) versmalling van de haveningang aan de bovenstroomse zijde in combinatie met doorlaatbare kribben bovenstrooms van de haveningang,
- (3) hoogwatergeul door de Nieuwe Dombosch,
- (4) zandspiraalbuizen voor de haveningang.

De versmalling van de haveningang en de hoogwatergeul zijn onderzocht met het FINEL2D model, de doorlatende kribben en de zandspiraalbuizen zijn relatief eenvoudig te ontwerpen.

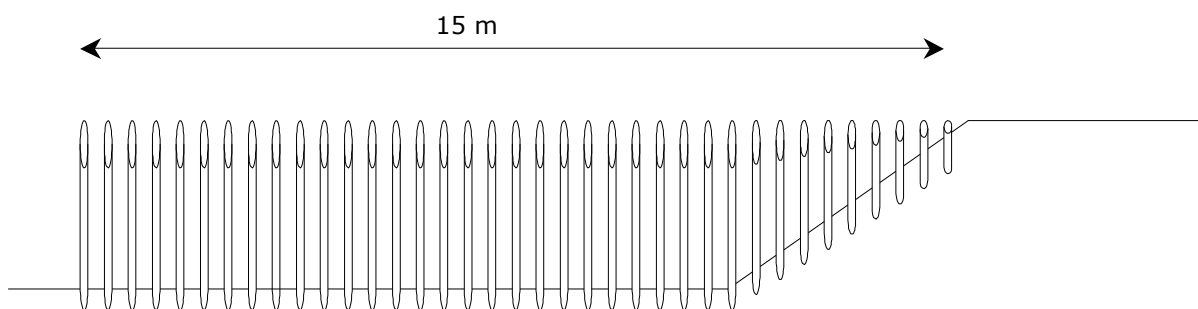
### 6.2.2 Uitwerking versmallen haveningang en doorlatende kribben

De versmalling wordt aan de westzijde van de haveningang voorzien. Over een lengte van 60 m evenwijdig aan de loswal wordt een damwand geslagen, die vervolgens wordt voortgezet over een lengte van 50 m, zie Figuur 6-1. De constructie is afgerond met een straal van 20 m om het stuwpunt niet te fixeren. Daarmee is de breedte van de haveningang gereduceerd van 180 m tot 120 m. Het effect van deze maatregel is in hoofdstuk 5 onderzocht met het FINEL2D model, zie paragraaf 5.7. Het effect van de havenversmalling voor met name hoogwatersituaties (1500 m<sup>3</sup>/s is onderzocht) is dat de sedimentatie in de haven met 10% à 20% reduceert ter plaatse van de koelwaterinlaat. Ook in de havenmond en de haven reduceert de sedimentatie licht.

De ontwerpregels voor doorlatende kribben zijn opgenomen in Bijlage E. Er zijn vijf doorlatende kribben voorzien met een lengte van 15 m (even lang als de bestaande stenen krib) en 60 m uit elkaar, een verhouding van 4 zoals aanbevolen in het ontwerp langs rechte oevers. De bestaande krib wordt verwijderd. De kribben zijn opgebouwd uit palen waarvan de bovenzijde op NAP+1 m ligt, het niveau van het aanliggende winterbed. De palen worden één paaldiameter uit elkaar geplaatst (50% stromingsblokkering), gezien de relatief korte kriblengte wordt geen variabele doorlatendheid voorzien. De palen worden doorgezet tot aan het winterbedniveau, zie Figuur 6-2.



Figuur 6-1 Havenversmalling en doorlatende kribben



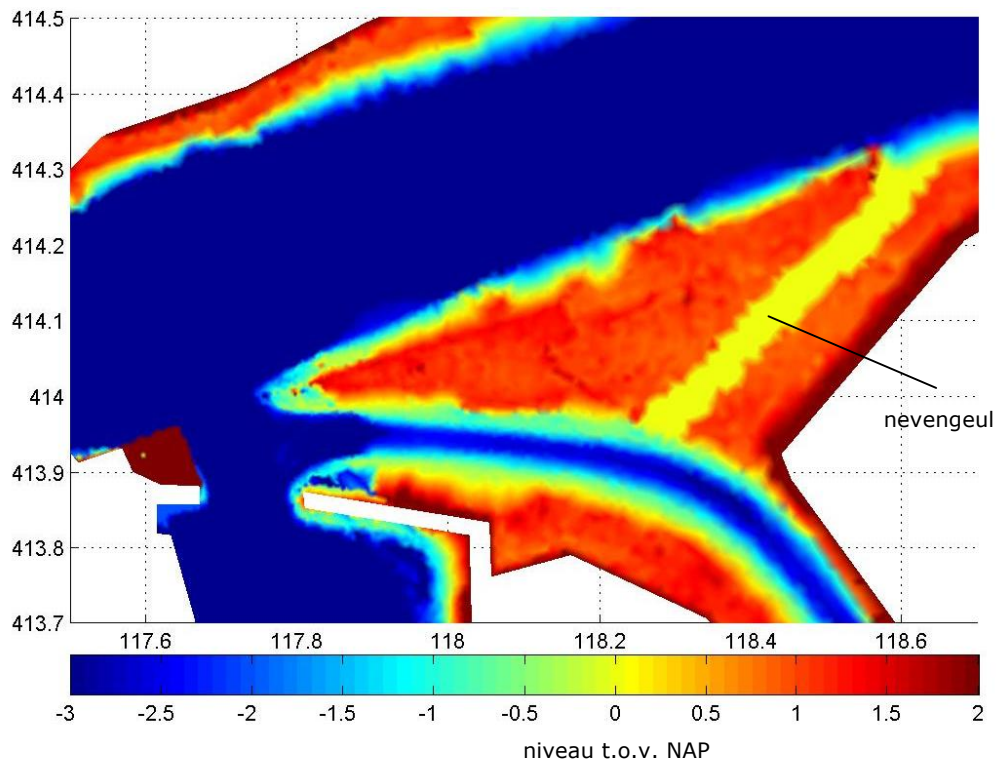
Figuur 6-2 Principe doorlatende krib voor de Amerhaven

De stroomsnelheden nabij de oever bovenstrooms van de haveningang zijn laag. Bij een rivierafvoer van 300 m<sup>3</sup>/s tot 0,2 m/s en bij 1500 m<sup>3</sup>/s tot 0,3 m/s. De stroomsnelheid per kribvak wordt bij een stromingsblokkering van 50% met een factor 0,8 à 0,9 gereduceerd, afhankelijk van de stromingsrichting in de rivier en de weerstandscoëfficiënt van de palen (zie Figuur E-2 in Bijlage E). Daarmee is na vijf kribvakken de stroomsnelheid voor de havenmond met een factor 0,8<sup>5</sup> à 0,9<sup>5</sup> oftewel 0,35 à 0,6 gereduceerd. Het verstopping van de openingen tussen de palen met sediment of vuil kan (tijdelijk) voor een verminderde werking van de doorlatende kribben leiden. De kribben werken dan meer als niet doorlatende kribben. Een voordeel daarvan is dat de hoge snelheden verder van de havenmond optreden, maar een nadeel is dat achter de benedenstroomse krib een neer ontstaat met verhoogde kans op sedimentatie. De verwachte reductie van de sedimentatie door de doorlatende kribben alleen wordt geschat op 10% à 20%. Deze reductie is gebaseerd op 50% zand in het transport (zie paragraaf A.1.8) en de helft van de snelheidsreductie (0,6) oftewel 30%.

De gecombineerde sedimentatiereductie van versmallen van de haveningang en vijf doorlatende kribben voor de haveningang is dan 20% à 40%.

### 6.2.3 Uitwerking hoogwatergeul

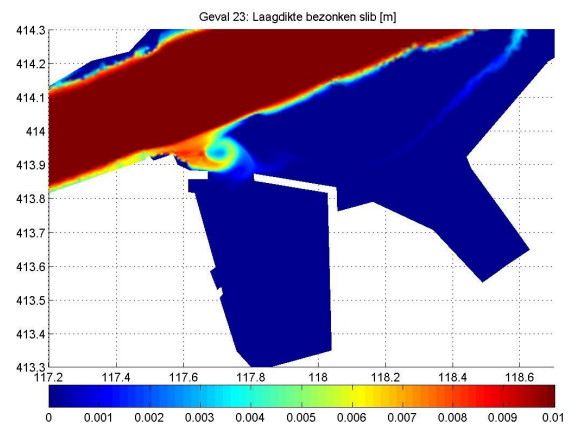
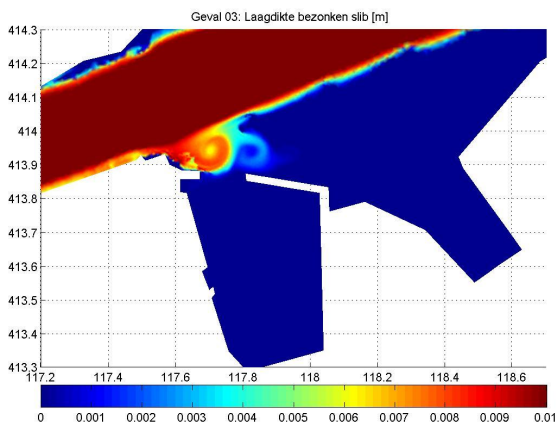
In paragraaf 5.8 is het resultaat van de berekeningen met een 400 m lange hoogwatergeul door de Nieuwe Dombosch beschreven. In het FINEL2D model van de Bergsche Maas en Amerhaven is een 50 m brede geul aangelegd met het bodemniveau op 0 m+NAP, zie Figuur 6-3. De beoogde werking van deze maatregel is dat de benedenloop van de Donge kan worden gebruikt als sedimentvang, indien hier via de nevengeul een zeker debiet doorheen wordt geleid. Vervolgens stroomt in de Dongemonding relatief sedimentarm water langs de havenmond, zodat de koelwaterinname via de haven mogelijk ook sedimentarmer zal zijn. Tevens beïnvloedt de nevengeul de neer in de havenmond, de neer verplaatst in de richting van de rivier.



Figuur 6-3 Bodemligging nevengeul door buitendijksgebied de Nieuwe Dombosch

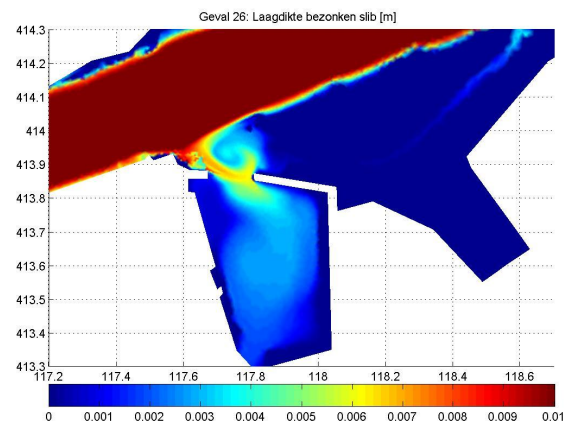
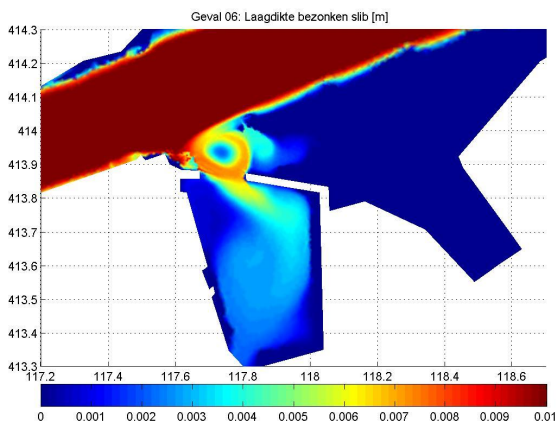
In paragraaf 5.8 is uitgebreid ingegaan op de effecten op de stroming en slibconcentratie van deze nevengeul. Kort samengevat zijn de effecten van een nevengeul:

- Het aanleggen van een nevengeul is redelijk effectief, met name in de situatie zonder koelwaterinname, maar ook in de situatie waarbij koelwater onttrokken wordt, zie Figuur 6-4. De neer wordt effectief verzwakt, waardoor de uitwisseling met de rivier zwakker is en er stroomt relatief schoon water vanuit de nevengeul langs de haveningang. Het effect van een nevengeul is alleen significant bij hoogwatersituaties (Bergsche Maas 1500 m<sup>3</sup>/s) als er door de nevengeul circa 10 m<sup>3</sup>/s stroomt.
- De verwachte reductie van de sedimentatie is 15% à 20% als koelwater via de haven wordt ingenomen door de Amercentrale.



Geval 3 (geen nevengeul):  
rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s

Geval 23 (met nevengeul):  
rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 0 m<sup>3</sup>/s



Geval 6 (geen nevengeul):  
rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s

Geval 26 (met nevengeul):  
rivierafvoer 1500 m<sup>3</sup>/s, koelwaterinname 30 m<sup>3</sup>/s

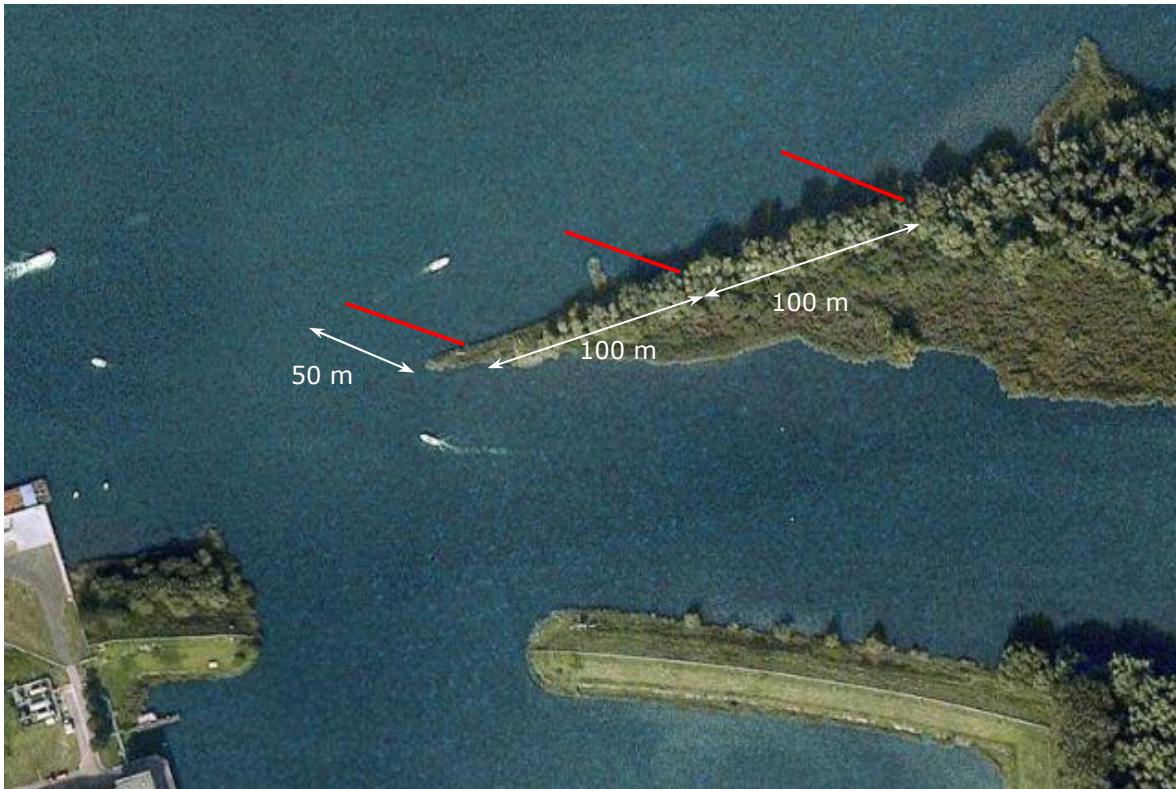
Figuur 6-4 Stromingspatronen in de havenmond met en zonder koelwaterinname

### 6.2.4 Uitwerking zandspiraalbuizen

De werking van een zandspiraalbuis is beperkt tot een klein gebied. Voor een inname punt van water werkt een zandspiraalbuis prima, maar voor een haveningang van 120 m breed is de werking van één zandspiraalbuis mogelijk te zwak. Voor de haveningang van de Amerhaven worden meerdere zandspiraalbuizen achter elkaar geplaatst. De afstand tussen twee zandspiraalbuizen  $L_o$  is in Bijlage F aangegeven als,

$$L_o = 0,5 \frac{C^2 h}{2g}$$

Voor de Amerhaven is geschat dat de Chézy-coëfficiënt  $C = 45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$  en de gemiddelde waterdiepte boven de zandspiraalbuizen is  $h = 2 \text{ m}$ . De afstand tussen twee zandspiraalbuizen is circa 100 m. Eén zandspiraalbuis wordt net voor haveningang geplaatst, een andere 100 m bovenstrooms daarvan en nog een 200 m bovenstrooms daarvan, zie Figuur 6-5. Voor bodemmateriaal met een diameter van  $200 \mu\text{m}$ , een gemiddelde stroomsnelheid boven de buizen van  $0,5 \text{ m/s}$  en een vangefficiëntie tussen 25% en 50%, is de aanpassingslengte voor het sedimenttransport benedenstrooms van de buis 40 m tot 60 m. Dat is minder dan de afstand tussen twee buizen, hetgeen dus voldoet, zie bijlage F.



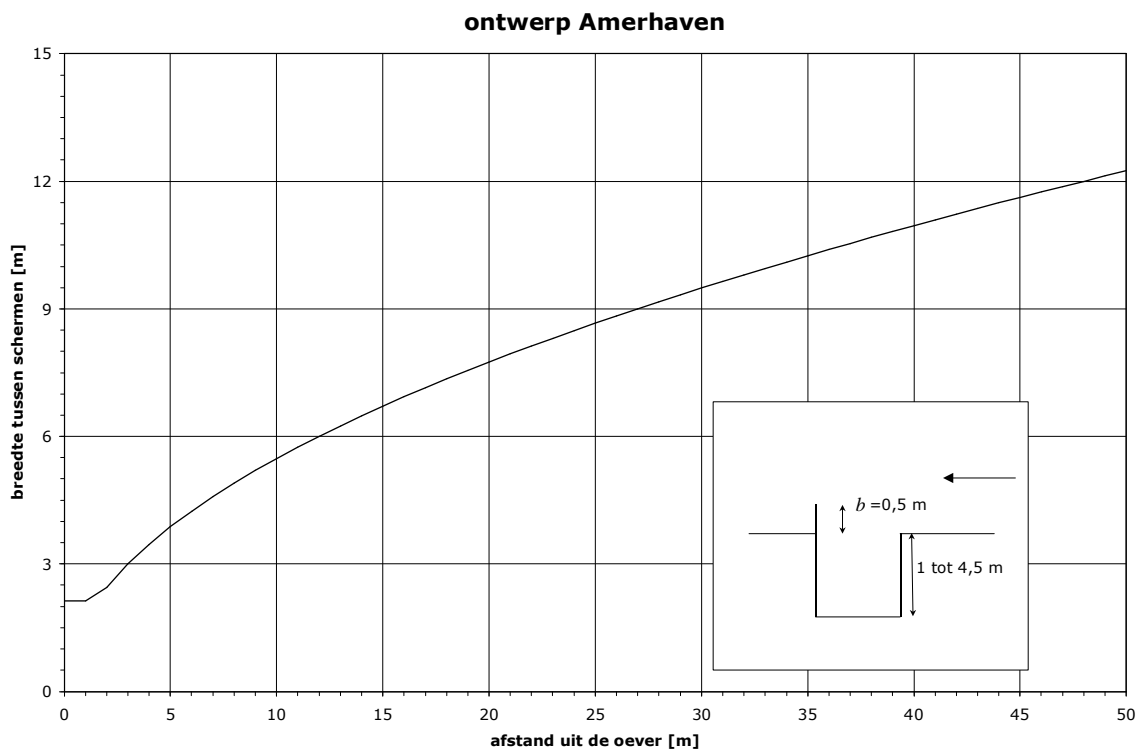
Figuur 6-5 Locatie zandspiraalbuizen bij Amerhaven

De keuze voor de lengte van de zandspiraalbuizen is vrij. Uit praktische overwegingen is gekozen om de zandspiraalbuizen te stoppen op de 4,5 m waterdieptelijijn. Daarmee is de lengte van de zandspiraalbuizen circa 50 m. De zandspiraalbuizen liggen onder  $45^\circ$  met de oeverlijn.

De afstand tussen de wanden van een zandspiraalbuis is te berekenen met de formules die in Bijlage E zijn opgenomen. Een belangrijke maat bij het ontwerp is de hoogte van de benedenstroomse wand boven de bodem. Die hoogte wordt bepaald door de stroomlijn boven de bodem die nog net in de zandspiraalbuis moet worden 'gevangen'. Als het sedimenttransport van het grovere bodemmateriaal in de onderste 0,3 m van de verticaal wordt getransporteerd, dan is de hoogte van het scherm boven de bodem  $(1,6 \cdot 0,3)$  0,5 m. Deze hoogte geeft voor de beroepsvaart geen beperkingen aangezien de schepen niet zo dicht langs de oever varen. Voor de pleziervaart geeft een scherm dat 0,5 m boven de bodem uitsteekt ook weinig beperkingen aangezien de diepte 20 m uit de oever 4 m is en langs de oever ongeveer 1 m, beide bij gemiddelde afvoercondities. Het verloop van de afstand tussen de wanden van de zandspiraalbuis is weergegeven in Figuur 6-6. Nabij de oever is de breedte circa 2 m en aan het

eind van de zandspiraalbuis is de breedte circa 12 m. De diepte van de zandspiraalbuis ontwikkelt zich in de loop van de tijd, maar bij aanleg wordt aanbevolen de diepte onder lokaal bodemniveau gelijk te nemen aan de breedte tussen de wanden.

De werking van de zandspiraalbuizen hangt af van de voorkomende stroomsnelheid in de rivier boven de buizen. In Bijlage F in Figuur F-6 is aangegeven dat voor bodemateriaal met een diameter van 200  $\mu\text{m}$  bij een waterdiepte van 1 à 2 m de benodigde stroomsnelheid 0,45 m/s tot 0,5 m/s is. Fijner bodemmateriaal dat hier ook voorkomt (zie Tabel A-2 en Figuur A-15) kan bij lagere snelheden worden getransporteerd. Mogelijk dat de stroomsnelheden een lange periode in het jaar te laag zijn om de zandspiraalbuizen open te houden en dat alleen bij afvoeren die 1 à 2 dagen per jaar voorkomen de stroomsnelheden hoog genoeg zijn. De kans op het verzanden van de zandspiraalbuizen is op deze locatie vermoedelijk groot.



Figuur 6-6 Afstand tussen wanden van zandspiraalbuis bij Amerhaven

De verwachte reductie van de sedimentaanvoer tot voor de havenmond is circa 15% à 35%. Dit is gebaseerd op een aandeel van 50% zand in het sediment (zie paragraaf A.1.8) en een effectiviteit van de zandspiraalbuizen voor zand van 50%.



## 6.3 Maatregelen overnachtingshaven Haaften

### 6.3.1 Onderbouwing keuze

De plannen voor aanpassen van de havenmond van Haaften zoals in rapport van Grontmij (2007) aangegeven zijn nog in een verkennende fase. Hoe de havenmond gaat worden aangepast, is op dit moment (2008) onbekend. De voorgestelde maatregelen zijn daarom gebaseerd op de huidige situatie en dienen eenvoudig en relatief goedkoop in uitvoering te zijn aangezien binnen een termijn van circa vijf jaar de haveninrichting en havenmond kunnen worden aangepast. Voor het verdere onderzoek komen bij voorkeur maatregelen in aanmerking waarvan het effect met een rekenmethode of een numeriek model kan worden onderzocht. Het effect moet dan niet zijn gebaseerd op drie-dimensionale stromingseffecten (spiraalstroming). Voor de overnachtingshaven Haaften komen de volgende maatregelen in aanmerking uit de opsomming in hoofdstuk 4, en zijn hieronder in volgorde van voorkeur gezet:

1. Het plaatsen van doorlatende kribben rond de haveningang. De gestrekte oevers worden vervangen door kribvakken opgebouwd met palenrijen. De palenrijen lopen door tot op het winterbed. De huidige oever moet gedeeltelijk worden afgegraven. Dit type kribben kan in een numeriek model als extra weerstand worden geschematiseerd. De manier van schematiseren is wellicht met de resultaten van het schaalmodel onderzoek van palenrijen (TUD, 2008) te onderbouwen. Voor het ontwerp van doorlaatbare kribben zijn ontwerpregels beschikbaar.
2. Het verkleinen van de breedte van de haveningang aan de bovenstroomse zijde met een parallel palenscherm. Het versmallen van de haveningang met een parallel palenscherm is met een numeriek 2D-model niet goed te onderzoeken. Wel is het effect van de versmalde haveningang met het model te onderzoeken, maar een palenrij is waterdoorlatend en dat is niet zondermeer in het model te schematiseren. Als de 'palen' als afzonderlijke droge punten kunnen worden geschematiseerd, mits het rekenrooster fijn genoeg is, is het de vraag of een numeriek model op zo'n kleine schaal de stromingseffecten kan berekenen.
3. Zandspiraalbuis. Het effect kan niet in een numeriek 2D-model worden onderzocht, maar voor het ontwerp van zandspiraalbuizen zijn ontwerpregels beschikbaar.
4. Het plaatsen van drempels en een parallel scherm bovenstrooms van de haveningang. Een drempel, of meerdere drempels, en een parallel scherm veroorzaakt een drie-dimensionaal stroombeeld dat het sediment beter uit de haven houdt. Deze maatregel is alleen goed in een schaalmodel te onderzoeken, hetgeen voorlopig geen optie is.

De volgende maatregelen zijn verder uitgewerkt:

- (1) het plaatsen van doorlaatbare kribben bovenstrooms van de haveningang,
- (2) het verkleinen van de breedte van de havenmond met een doorlatende palenrij,
- (3) zandspiraalbuizen voor de haveningang.

Voor deze maatregelen zijn geen berekeningen uitgevoerd met een numeriek stromingsmodel. De doorlatende kribben en de zandspiraalbuizen zijn relatief eenvoudig te ontwerpen. Het effect van de versmalling van de haveningang is op basis van expert judgement geschat.

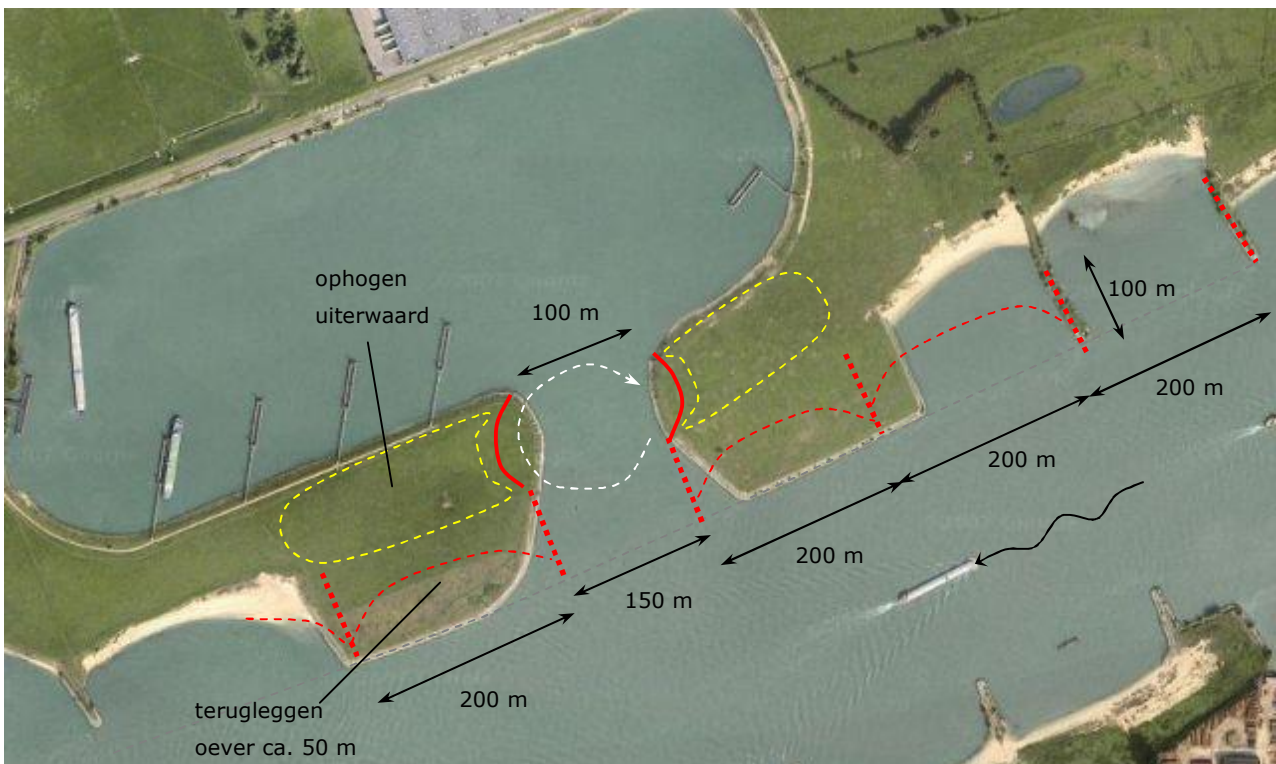
### 6.3.2 Uitwerking aanpassen haveningang en doorlatende kribben

De aanpassing van de haveningang met doorlatende kribben moet leiden tot een smallere haveningang waarin een rustiger stroombeeld heerst met name tijdens hoogwatersituaties. Door het reduceren van de verschillen in de stroomsnelheden tussen de rivier en de

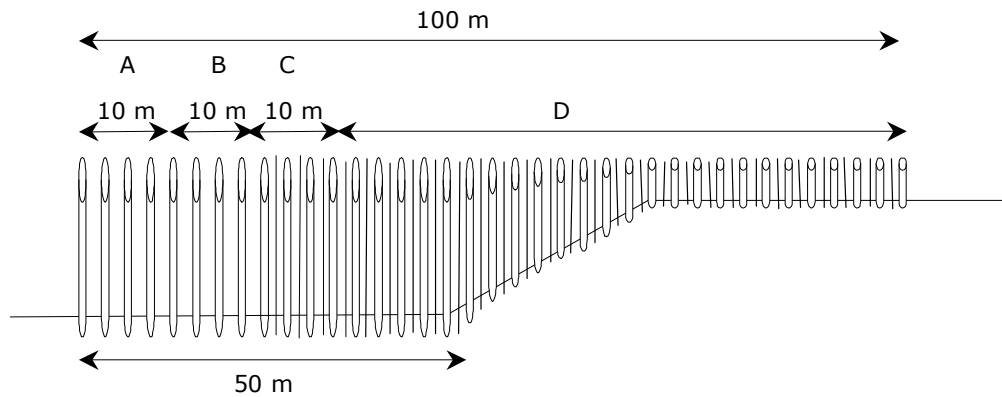
haveningang zal de neer in de haveningang minder sterk worden aangedreven en daarmee ook de sedimentuitwisseling worden gereduceerd.

De twee bestaande stenen kribben bovenstrooms van de haveningang en de gestrekte oever aan weerszijde ervan, worden (deels) verwijderd en vervangen door zes doorlatende kribben. De ontwerpregels voor doorlatende kribben zijn opgenomen in Bijlage E. De breedte van de haveningang wordt gereduceerd van 280 m naar 150 m, zie Figuur 6-7. De breedte van de haveningang aan de havenzijde blijft 100 m. De vormgeving van de haveningang is zo dat er in het achterste gedeelte een neer wordt gefixeerd tussen de oevers. Deze neer wordt aangedreven door de stroming door de kribben onder normale omstandigheden en tijdens hoogwater. De functie van de gefixeerde neer is het vrijhouden van de doorvaart van sediment. Sediment vanuit de rivier zal via de neer langs de randen van de ingang worden afgezet en door uitwisseling in de diepe haven uiteindelijk worden afgezet.

In twee kribvakken bovenstrooms van de haveningang worden de stenen kribben vervangen door doorlatende kribben. De gestrekte oever aan weerszijde van de haveningang worden circa 50 m teruggelegd en met het vrijgekomen materiaal wordt de uiterwaard langs de haven opgehoogd, zie Figuur 6-7. Verruimen van het doorstroomprofiel kan morfologische gevolgen hebben voor de rivier, met name tijdens hoogwateromstandigheden met veel sedimenttransport. De diepte in de vaargeul kan daardoor afnemen. Door het ophogen van de uiterwaard wordt de verruiming van het stroomprofiel door de afgraving gecompenseerd tijdens hoogwatersituaties. In totaal worden zes rijen doorlatende kribben geplaatst met een lengte van 100 m die doorlopen tot op de uiterwaard. De bovenzijde van de kribben ligt 1 m boven het uiterwaardniveau. De kribafstand voor deze recht verlopende oever is 200 m, dat is viermaal de kriblengte gerekend met een netto kriblengte van 50 m tijdens normale stromingsomstandigheden.



Figuur 6-7 Havenversmalling met doorlatende kribben



Figuur 6-8 Principe doorlatende krib in de vorm van een palenrij

Het globale ontwerp van de doorlatende kribben is weergegeven in Figuur 6-8. De stromingsblokkering is als volgt:

- A: van kribkop tot 10 m is de stromingsblokkering 20%,
- B: van 10 m uit de kribkop tot 20 m is de stromingsblokkering 30%,
- C: van 20 m uit de kribkop tot 30 m is de stromingsblokkering 40%,
- D: van 30 m uit de kribkop tot de kribwortel is de stromingsblokkering 50%.

De stroomsnelheden nabij de oever bovenstrooms van de haveningang zijn hoog, bij een rivierafvoer van  $6000 \text{ m}^3/\text{s}$  tot  $1 \text{ m/s}$ . De stroomsnelheid per kribvak wordt bij een stromingsblokkering van 45% (gewogen gemiddelde van de verlopende stromingsblokkering) met een factor  $0,85$  à  $0,9$  gereduceerd, afhankelijk van de stromingsrichting in de rivier en de weerstandscoëfficiënt van de palen (zie Figuur E-2 in Bijlage E). Daarmee is na de vier bovenstroomse kribben de stroomsnelheid voor de havenmond met een factor  $0,85^5$  à  $0,9^5$  oftewel  $0,45$  à  $0,6$  gereduceerd. Het verstopping van de openingen tussen de palen met sediment of vuil kan (tijdelijk) voor een verminderde werking van de doorlatende kribben leiden. De kribben werken dan meer als niet doorlatende kribben. Een voordeel daarvan is dat de hoge snelheden verder van de havenmond optreden, maar een nadeel is dat achter de benedenstroomse krib een neer ontstaat met verhoogde kans op sedimentatie.

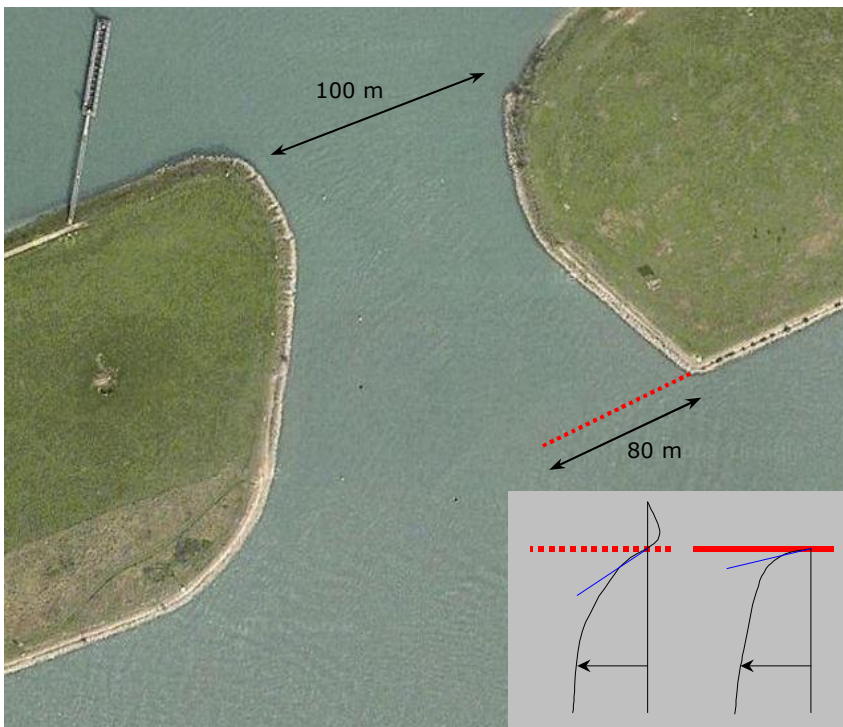
De verwachte reductie van de sedimentatie door de doorlatende kribben alleen wordt geschat op  $50\%$  à  $70\%$ . Deze reductie is gebaseerd op  $100\%$  zand in het transport (zie paragraaf A.2) en de helft van de snelheidsreductie ( $0,6$ ) oftewel  $60\%$ .

### 6.3.3 Uitwerking versmallen haveningang

Het versmallen van de haveningang met een parallelle doorlatende constructie is in Figuur 6-9 weergegeven. Met deze maatregel wordt naast een kleinere uitwisselingsafstand tussen rivier en haven ook een verkleining van de snelheidsgradiënt tussen rivier en haven nagestreefd. Daarmee wordt beoogd dat de menglaag minder sterk ontwikkelt en de uitwisseling tussen rivier en haveningang minder sterk is. Ook de afmetingen van de neer in de havenmond zal kleiner zijn dan in de huidige situatie. De stromingsblokkering van de constructie is  $50\%$ .

Het verwachte effect van het versmallen van de haveningang is een maximale reductie van  $30\%$  ( $80 \text{ m}/280 \text{ m}$ ) van de lengte waarover water en zwevend sediment kunnen uitwisseling. Met een doorlatende constructie is de netto versmalling minder, maar dat kan deels worden gecompenseerd door kleinere gradiënt in de horizontale stroomsnelheidsverdeling, zie Figuur 6-9. Of beide effecten elkaar versterken of tegenwerken kan niet worden bepaald met een

twee-dimensionaal stromingsmodel, is de verwachting. In een schaalmodelonderzoek kan het effect wel worden onderzocht. Geschat wordt dat de sedimentatiereductie 20% à 40% is door de versmalling van de haveningang met een doorlatende palenrij.



Figuur 6-9 Versmalling haveningang met parallel geplaatste doorlatende constructie

### 6.3.4 Uitwerking zandspiraalbuizen

De werking van een zandspiraalbuis is beperkt tot een klein gebied. Voor een inname punt van water werkt een zandspiraalbuis prima, maar voor een haveningang van 280 m breed is de werking van één zandspiraalbuis mogelijk te zwak. Voor de haveningang van de haven van Haften worden meerdere zandspiraalbuizen achter elkaar geplaatst. Voor het bepalen van de afstand tussen twee zandspiraalbuizen wordt de methode toegepast zoals in Bijlage F beschreven. De afstand tussen twee zandspiraalbuizen  $L_o$  is in Bijlage F aangegeven als,

$$L_o = 0,5 \frac{C^2 h}{2g}$$

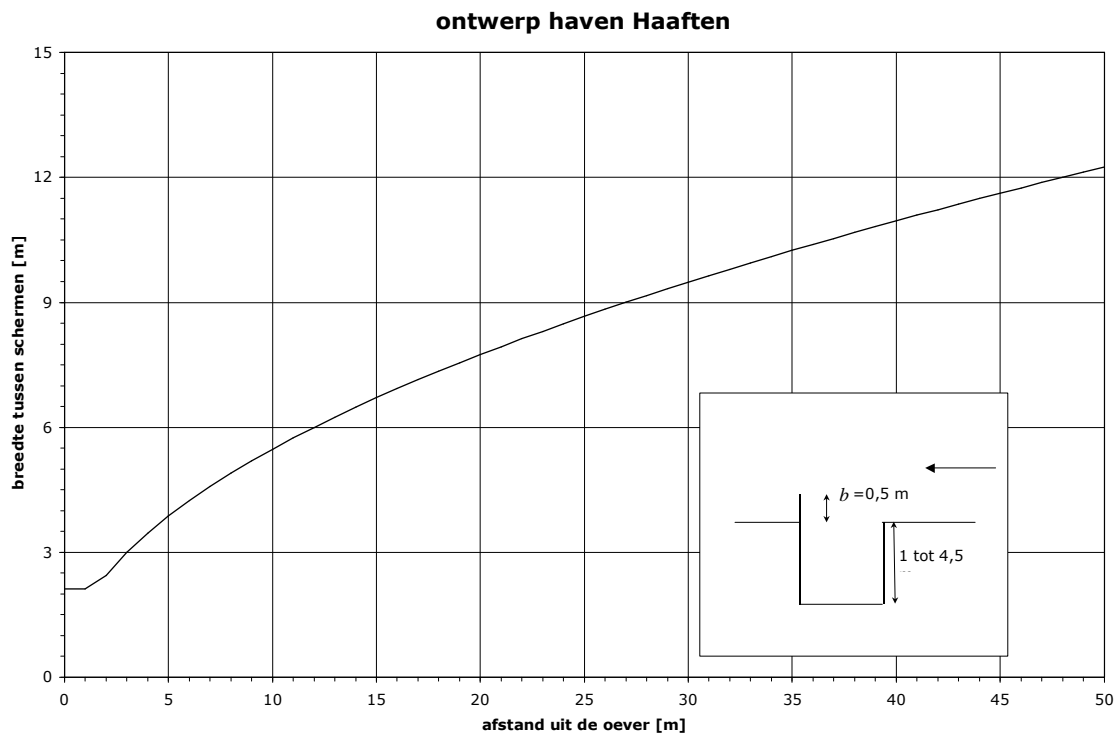
Voor de overnachtingshaven Haften is geschat dat de Chézy-coëfficiënt  $C = 45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$  en de gemiddelde waterdiepte boven de zandspiraalbuizen is  $h = 3 \text{ m}$ . De afstand tussen twee zandspiraalbuizen is circa 150 m. Eén zandspiraalbuis wordt net voor haveningang geplaatst, een andere 150 m bovenstrooms daarvan en nog een 150 m bovenstrooms daarvan, zie Figuur 6-10. Voor bodemmateriaal met een diameter van  $200 \mu\text{m}$ , een gemiddelde stroomsnelheid boven de buizen van  $1 \text{ m/s}$  en een vangefficiëntie tussen 25% en 50%, is de aanpassingslengte  $L_s$  voor het sedimenttransport benedenstrooms van de buis 135 m tot 165 m. Dat is ongeveer de afstand tussen twee buizen, hetgeen dus net voldoet, zie bijlage F.



Figuur 6-10 Locatie zandspiraalbuizen bij haven Haaften

De keuze voor de lengte van de zandspiraalbuizen is vrij. Uit praktische overwegingen is gekozen om de zandspiraalbuizen te stoppen op 5 m waterdiepte (t.o.v. NAP). Daarmee is de lengte van de zandspiraalbuizen 50 m. De zandspiraalbuizen liggen onder  $45^\circ$  met de oeverlijn. De afstand tussen de wanden van een zandspiraalbuis is te berekenen met de formules die in Bijlage F zijn opgenomen. Een belangrijke maat bij het ontwerp is de hoogte van de benedenstroomse wand boven de bodem. Die hoogte wordt bepaald door de stroomlijn boven de bodem die nog net in de zandspiraalbuis moet worden 'gevangen'. Als het sedimenttransport van het grovere bodemmateriaal in de onderste 0,3 m van de verticaal wordt getransporteerd, dan is de hoogte van het scherm boven de bodem ( $1,6 \cdot 0,3$ ) 0,5 m. Deze hoogte geeft voor de beroepsvaart geen beperkingen bij een waterdiepte van 3 à 4 m aangezien de vaardiepte voor schepen 2,8 m is. Het verloop van de afstand tussen de wanden van de zandspiraalbuis is weergegeven in Figuur 6-11. Nabij de oever is de breedte circa 2 m en aan het eind van de zandspiraalbuis is de breedte circa 12 m. De diepte van de zandspiraalbuis ontwikkelt zich in de loop van de tijd, maar bij aanleg wordt aanbevolen de diepte onder lokaal bodemniveau gelijk te nemen aan de breedte tussen de wanden.

De werking van de zandspiraalbuizen hangt af van de voorkomende stroomsnelheid in de rivier boven de buizen. In Bijlage F in Figuur F-6 is aangegeven dat voor bodemmateriaal met een diameter van  $200 \mu\text{m}$  bij een waterdiepte van 1 à 2 m de benodigde stroomsnelheid 0,45 m/s tot 0,5 m/s is. Bij grotere waterdiepte 3 à 4 m is de benodigde stroomsnelheid 0,55 tot 0,6 m/s. Fijner bodemmateriaal dat hier ook voorkomt (zie Tabel A-2 en Figuur A-15) kan bij lagere snelheden worden getransporteerd. Op deze locatie zijn de stroomsnelheden doorgaans hoog genoeg om de zandspiraalbuizen te laten werken. De kans op het verzanden van de zandspiraalbuizen is op deze locatie vermoedelijk gering.

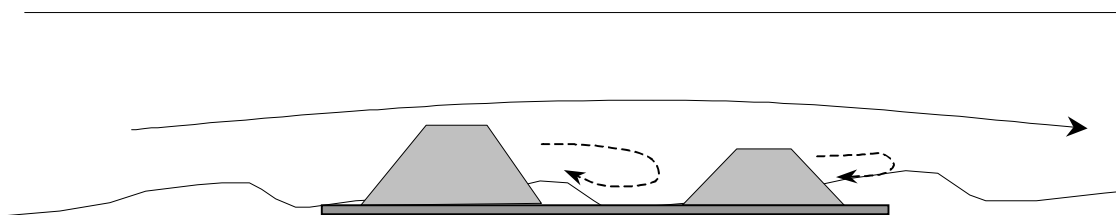


Figuur 6-11 Afstand tussen wanden van zandspiraalbuis bij haven Haaften

De verwachte reductie van de sedimentaanvoer tot voor de havenmond is circa 50%. Dit is gebaseerd op een aandeel van 100% zand in het sediment (zie paragraaf A.1.8) en een effectiviteit van de zandspiraalbuizen voor zand van 40% à 60%.

**Opmerking**

In een druk bevaren waterloop kunnen de zandspiraalbuizen worden opgebouwd uit onderwater dammen opgebouwd uit breuksteen op een filter, zie Figuur 6-12. Het voordeel is een eenvoudige constructie en daardoor is een eventuele reparatie eenvoudig uit te voeren door extra breuksteen te storten en te profileren. Daarmee is de schade aan de zandspiraalbuis na een aanvaring door een schip eenvoudig te herstellen. Daarnaast zal de schade aan het schip heel beperkt zijn (een paar krassen en strepen in de verf).



Figuur 6-12 Schets van zandspiraalbuis opgebouwd uit breukstenen dammen

## 7 Kosten-batenanalyse

### 7.1 Inleiding

Een globale kosten-baten analyse kan worden uitgevoerd voor de voorgestelde maatregelen per haven en het verwachte effect van de maatregelen op de baggerinspanning. De kosten-baten analyse is globaal aangezien het ontwerp van de maatregelen niet een 'besteksklaar' ontwerp is, maar een schetsontwerp. Daarvan kunnen de kosten van aanleg globaal worden geschat. Ook het effect op de sedimentatie in en rond de havens is gebaseerd op 'experts judgement' en enkele verkennende berekeningen met FINEL2D. De resultaten van de kosten-batenanalyse dienen ter ondersteuning van een keuze tussen bijvoorbeeld twee veelbelovende maatregelen die in een vervolg traject van het WINN-project verder worden uitgewerkt en ontworpen. De kosten voor materiaal, materieel en arbeid is geschat op basis van de GWW (2005) (geïndexeerd voor 2008).

### 7.2 Gegevens kosten en baten

#### 7.2.1 Kosten maatregelen industriehaven Amercentrale

De beschrijving van de maatregelen voor de industriehaven van de Amercentrale is opgenomen in paragraaf 6.2.2 t/m 6.2.4.

##### **Kosten doorlaatbare kribben**

De kosten voor het afbreken van de korte bestaande krib worden geschat op € 10.000,- (excl. BTW). De doorlatende kribben worden opgebouwd uit houten palen rond 120 mm die met een tussenruimte van één paaldiameter worden geslagen. De paallengte is 6 à 7 m. De kosten voor aanschaf en het aanbrengen van één paal zijn € 25,-. De totale kosten per krib voor de Amerhaven met een kriblengte van 15 m bestaande uit 60 palen ieder, zijn € 1.500,- (excl. BTW).

##### **Kosten verwijderen bestaande stenen kribben**

Het verwijderen van de 15 m lange krib gelegen net bovenstrooms van de haveningang wordt geschat op € 10.000,-. De waarde van de vrijgekomen materialen voor de krib wordt geschat op € 10.000,-. Het verwijderen van de krib bovenstrooms van de Amerhaven zou dus kostenneutraal kunnen zijn.

##### **Kosten grondwerk**

Voor een 400 m lange en 50 m brede nevengeul met een diepte van 1,5 m moet 30.000 m<sup>3</sup> grond worden afgevoerd. De kosten voor het grondwerk voor de nevengeul worden geschat op € 30.000,-.

##### **Kosten drempel inlaat nevengeul**

De kosten voor de aanleg van een 50 m brede drempel (breedte bestorting 20 m) inclusief filterlagen bij de inlaat van de nevengeul worden geschat op € 30.000,- (excl. BTW).

##### **Kosten havenversmalling**

Opgebouwd uit houten damwandplanken 5 m lang over een lengte van 110 m, kosten per m<sup>1</sup> zijn € 400,-. Totale kosten materiaal en aanbrengen € 44.000,-.

### Kosten zandspiraalbuizen

Opgebouwd uit houten damwandplanken met een lengte van 2 m over een lengte van 50 m, dus per zandspiraalbuis 100 m. Kosten per m<sup>1</sup> zijn € 200,-. Totale kosten één zandspiraalbuis van 50 m lengte zijn € 20.000,-.

### 7.2.2 Baten Amerhaven door reductie baggerwerk

De baten bestaan uit een reductie van de hoeveelheid te baggeren materiaal per jaar. In Barneveld et al. (2007) is aangegeven dat een reductie van de sedimentatie van 25% wordt verwacht. De kosten voor het baggeren en verwerken van klasse 3 tot 4 baggerspecie (aanwezig in deze haven) zijn voor stort Comstrijen zijn € 3,- tot € 5,- per m<sup>3</sup> en stort de Slufter € 7,- tot € 9,- per m<sup>3</sup>. Gemiddeld worden de kosten geschat op € 6,-/m<sup>3</sup>.

De gemiddelde baggerhoeveelheid is 7.000 à 11.000 m<sup>3</sup>/jaar, zie paragraaf 3.2. De reductie van het baggervolume is afhankelijk van de effectiviteit van de maatregel om zand in de rivier te houden. Voor drie reductiepercentages (hoog 50%, midden 40% en laag 30%) is de reductie van het baggervolume bepaald alsmede de reductie van de kosten. Uitgangspunt is dat 50% van het baggervolume bestaat uit zand en alleen de hoeveelheid zand wordt met de constructie gereduceerd. De aanname is dat de slibconcentratie homogeen verdeeld is in de verticaal en dat de maatregel daarop nauwelijks een reducerend effect heeft. Dit resulteert in een:

- effectiviteit van de maatregel 50%, reductie baggervolume 1.750 à 2.750 m<sup>3</sup>/jaar dat is (50% van 50%) 25%, besparing baggerkosten € 10.500,- à € 16.500,- per jaar.
- effectiviteit van de constructie is 40% dan is de reductie van het baggervolume 1.400 à 2.200 m<sup>3</sup>/jaar dat is (40% van 50%) 20%, besparing baggerkosten € 8.400,- à € 13.200,- per jaar.
- effectiviteit van de constructie is 30% dan is de reductie van het baggervolume 1.050 à 1.650 m<sup>3</sup>/jaar dat is (30% van 50%) 15%, besparing baggerkosten € 6.300,- à € 9.900,- per jaar.

Opmerking: Door de maatregel kan het slib elders bezinken waar het problemen oplevert. In deze beschouwing is daarvan niet uitgegaan.

Een belangrijke kostenpost ontstaat als de eenheid Amer 8 van de energiecentrale moet worden afgeschakeld doordat er geen koelwater kan worden ingenomen via de haven (eenheid Amer 9 onttrekt koelwater uit de Bergsche Maas). Dat zou kunnen voorkomen bij te veel sedimentatie nabij de haveningang of koelwaterinlaat, hoewel de kans daarop uiterst klein is aangezien Essent die ontwikkelingen geregeld volgt. Bij te veel sediment in het koelwater kan het leidingsysteem verstopten waardoor de koelwater stroomt kan worden onderbroken. Het stilleggen van een eenheid kost circa € 500.000,- per dag, hierin zijn de extra kosten voor opstarten en optredende warmteverliezen niet meegerekend (mondelijke informatie van Essent). Deze kosten zijn hier slechts genoemd en niet in de beschouwing meegenomen.

Kwalitatief zijn de volgende baten te noemen naast een reductie van de baggerkosten. Het reduceren van de sedimentatie beperkt de kans op grondingen van schepen in de havenmond en industriehaven. Bij diepte-beperkingen zou de belading van de bakken moeten worden aangepast (minder volbeladen) om gronding te voorkomen. Voor deze haven bemoeilijkt de dwarsstroming in de haveningang de invaart van de schepen. Aanpassen van het stroombeeld ten gunste van de invarende schepen reduceert de kans op grondingen of aanvaringen. De vraag is in welke mate de voorgestelde maatregelen de veiligheid voor de scheepvaart



vergroten. De baten van de genoemde effecten zijn in de verdiepingsslag moeilijk te schatten en zijn verder buiten beschouwing gelaten.

### **7.2.3 Kosten maatregelen overnachtingshaven Haaften**

De beschrijving van de maatregelen voor de overnachtingshaven Haaften is opgenomen in paragraaf 6.3.2 t/m 6.3.4.

#### **Kosten doorlaatbare kribben**

De kosten voor het afbreken van de korte bestaande krib worden geschat op € 10.000,- (excl. BTW). De doorlatende kribben worden opgebouwd uit houten palen rond 120 mm die met een tussenruimte van één paaldiameter worden geslagen. De paallengte is 6 à 7 m. De kosten voor aanschaf en het aanbrengen van één paal zijn € 25,-. De totale kosten per krib voor Haaften met een kriblengte van 100 m bestaande uit 420 palen ieder, zijn € 10.500,- (excl. BTW).

#### **Kosten verwijderen bestaande stenen kribben**

Het verwijderen van twee kribben gelegen bovenstrooms van de haveningang over een lengte van 100 m en de gestrekte oever en oeverbescherming in de havenmond met een totale lengte van circa 700 m wordt geschat op € 50.000,-. De waarde van de vrijgekomen materialen wordt geschat op € 50.000,-. Het verwijderen van de oeverbescherming en twee kribben bovenstrooms van de haven bij Haaften zou dus ook kostenneutraal kunnen zijn.

#### **Kosten grondwerk**

Over een lengte van 400 m en breedte van 50 m moet de oever worden 2 m afgegraven, een volume van 40.000 m<sup>3</sup>. De vrijgekomen grond wordt gebruikt voor de ophoging van de uiterwaard rond de haveningang. De totale kosten voor het ontgraven en aanvullen van de grond worden geschat op € 40.000,- (excl. BTW).

#### **Kosten havenversmalling**

Opgebouwd uit houten palen rond 120 mm met een lengte van 6 à 7 m. De kosten voor aanschaf en het aanbrengen van één paal zijn € 25,-. De versmalling is 80 m waarvoor 350 palen nodig zijn. De totale kosten van de versmalling zijn € 10.000,- (excl. BTW).

#### **Kosten zandspiraalbuizen**

Opgebouwd uit houten damwandplanken met een lengte van 2 m over een lengte van 50 m, dus per zandspiraalbuis 100 m. Kosten per m<sup>1</sup> zijn € 200,-. Totale kosten één zandspiraalbuis van 50 m lengte zijn € 20.000,-.

### **7.2.4 Baten Haaften door reductie baggerwerk**

De baten bestaan uit een reductie van de hoeveelheid te baggeren materiaal per jaar. In Barneveld et al. (2007) is aangegeven dat een reductie van de sedimentatie van 25% wordt verwacht. De kosten voor het baggeren en verwerken van klasse 3 tot 4 baggerspecie (bovengrens, maar wellicht schoner materiaal) zijn gemiddeld geschat op € 6,-/m<sup>3</sup>.

De gemiddelde baggerhoeveelheid is 2.000 m<sup>3</sup>/jaar, zie paragraaf 3.3. De reductie van het baggervolume is afhankelijk van de effectiviteit van de maatregel om zand in de rivier te houden. Voor drie reductiepercentages (hoog 50%, midden 40% en laag 30%) is de reductie van het baggervolume bepaald alsmede de reductie van de kosten. Uitgangspunt is dat 50% van het baggervolume bestaat uit zand en alleen de hoeveelheid zand wordt met de constructie

gereduceerd. De aanname is dat de slibconcentratie homogeen verdeeld is in de verticaal en dat de maatregel daarop nauwelijks een reducerend effect heeft. Dit resulteert in een:

- effectiviteit van de maatregel 50%, reductie baggervolume 500 m<sup>3</sup>/jaar dat is (50% van 50%) 25%, besparing baggerkosten € 3.000,- per jaar.
- effectiviteit van de constructie is 40% dan is de reductie van het baggervolume 400 m<sup>3</sup>/jaar dat is (40% van 50%) 20%, besparing baggerkosten € 2.400,- per jaar.
- effectiviteit van de constructie is 30% dan is de reductie van het baggervolume 300 m<sup>3</sup>/jaar dat is (30% van 50%) 15%, besparing baggerkosten € 1.800,- per jaar.

Opmerking: Door de maatregel kan het slib elders bezinken waar het problemen oplevert. In deze beschouwing is daarvan niet uitgegaan.

Kwalitatief zijn de volgende baten te noemen naast een reductie van de baggerkosten. Het reduceren van de sedimentatie beperkt de kans op grondingen van schepen in de havenmond en overnachtingshaven. Belangrijk is voor deze haven, gezien het aantal grondingen in het verleden, dat de veiligheid voor invarende schepen toeneemt. Dat heeft overigens meer te maken met de belijning en bakens dan met ondiepte. Bij diepte-beperkingen zou de belading van de schepen moeten worden aangepast (minder volbeladen) om gronding te voorkomen. Het betreft hier echter een overnachtingshaven, waardoor deze baten nauwelijks een rol spelen. Aanpassen van het stroombeeld ten gunste van de invarende schepen reduceert de kans op grondingen of aanvaringen. De vraag is in welke mate de voorgestelde maatregelen de veiligheid voor de scheepvaart vergroten. De baten van de genoemde effecten zijn in de verdiepingsslag moeilijk te schatten en zijn verder buiten beschouwing gelaten.

### 7.3 Rekenmethode kosten-batenanalyse

De netto contante waarde  $N$  wordt als volgt berekend:

$$N = \frac{B_1}{r} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{(1+r)^t} \right] - K_0 \quad (7-1)$$

waarin:  $B_1$  = jaarlijkse baten (in het eerste jaar),  $r$  = discontovoet,  $t$  = levensduur en  $K_0$  = aanlegkosten.

Voor de levensduur wordt 30 jaar aangehouden en de discontovoet is gemiddeld over die periode op 2,5% gesteld. De baten voor het eerste jaar  $B_1$  na aanleg van de maatregel wordt gebruikt in de formule en de aanlegkosten  $K_0$ .

## 7.4 Kosten-baten industriehaven Amercentrale

Alle kosten van de verschillende maatregelen en de baten zijn schattingen zoals onderbouwd in paragraaf 7.2 en uitgedrukt in Euro's en exclusief BTW. De netto contante waarde is voor drie verschillende efficiëntieniveaus van de sedimentatiereductie weergegeven in deze paragraaf.

### Doorlaatbare kribben en versmallen haveningang

- Het verwijderen bestaande krib is kostenneutraal.
- De kosten voor de aanleg van vijf doorlatende kribben met een lengte van 15 m is 5 x € 1.500,-, totaal € 7.500,-
- Kosten versmallen van de haveningang € 44.000,-.

De totale kosten voor deze maatregel zijn € 51.500,-.

### Nevengeul door Nieuwe Dombosch

- Kosten aanleg van een nevengeul door de Nieuwe Dombosch € 30.000,-.
- Kosten aanleg van een drempel bij de inlaat van de nevengeul € 30.000,-.

De totale kosten voor deze maatregel zijn € 60.000,-.

### Zandspiraalbuizen

Totale kosten voor aanleg van drie zandspiraalbuizen met een lengte van 50 m zijn € 60.000,-.

### Netto contante waarde

De geschatte aanlegkosten van de maatregelen zijn in Tabel 7-1 opgenomen samen met de jaarlijkse kostenreductie van het baggeren. Bij de berekening is uitgegaan van de laagste baggerhoeveelheden per jaar (7.000 m<sup>3</sup>/jaar). Daaruit is de netto contante waarde na 30 jaar te berekenen en de gemiddelde netto contante waarde per jaar.

maatregeltype	reductie bagger-volume	kosten-reductie per jaar	aanleg-kosten	netto contante waarde na 30 jaar	netto contante waarde gem. per jaar
5 doorlatende kribben en versmallen nevengeul 400 m x 50 m	25%	€ 10.500,-	€ 51.500,-	€ 168.000,-	€ 5.600,-
3 zandspiraalbuizen			€ 60.000,-	€ 160.000,-	€ 5.300,-
			€ 60.000,-	€ 160.000,-	€ 5.300,-
5 doorlatende kribben en versmallen nevengeul 400 m x 50 m	20%	€ 8.400,-	€ 51.500,-	€ 124.000,-	€ 4.100,-
3 zandspiraalbuizen			€ 60.000,-	€ 115.000,-	€ 3.900,-
			€ 60.000,-	€ 115.000,-	€ 3.900,-
5 doorlatende kribben en versmallen nevengeul 400 m x 50 m	15%	€ 6.300,-	€ 51.500,-	€ 80.000,-	€ 2.700,-
3 zandspiraalbuizen			€ 60.000,-	€ 72.000,-	€ 2.400,-
			€ 60.000,-	€ 72.000,-	€ 2.400,-

Tabel 7-1 Netto contante waarde drie maatregelen Amerhaven bij 7.000 m<sup>3</sup>/jaar baggeren als functie van de reductie van het baggervolume

Uit de kosten-baten analyse komt de versmalling en doorlatende kribben als maatregel met de hoogste netto-contante waarde. De onderhoudskosten zijn buiten beschouwing gelaten. Bij de keuze voor een maatregel spelen echter andere argumenten, criteria en belangen een rol. Te noemen zijn de scheepvaart (verbeteren in- en uitvaren, veiligheid en de duur van de aanleg van de maatregel met betrekking tot hinder voor de scheepvaart.

## 7.5 Kosten-baten overnachtingshaven Haaften

### Doorlaatbare kribben

- Het verwijderen bestaande kribben is kostenneutraal.
- De kosten voor de aanleg van zes doorlatende kribben met een lengte van 100 m is 6 x € 10.500,-, totaal € 63.000,-

De totale kosten voor deze maatregel zijn € 63.000,-.

### Versmallen haveningang

De haveningang wordt 80 m versmald met een palenrij. De aanlegkosten zijn € 10.000,-.

### Zandspiraalbuizen

Totale kosten voor aanleg van drie zandspiraalbuizen met een lengte van 50 m zijn € 60.000,-.

### Netto contante waarde

De geschatte aanlegkosten van de maatregelen zijn in Tabel 7-1 opgenomen samen met de jaarlijkse kostenreductie van het baggeren op basis van gemiddeld 2000 m<sup>3</sup>/jaar. Daaruit is de netto contante waarde na 30 jaar te berekenen en de gemiddelde netto contante waarde per jaar.

De doorlatende kribben en de zandspiraalbuizen laten een negatieve netto contante waarde zien, te gevolge van de relatief hoge aanlegkosten.

maatregeltype	reductie bagger-volume	kosten-reductie per jaar	aanleg-kosten	netto contante waarde na 30 jaar	netto contante waarde gem. per jaar
6 doorlatende kribben haveningang versmallen 3 zandspiraalbuizen	25%	€ 3.000,-	€ 63.000,- € 10.000,- € 60.000,-	-€ 200,- € 53.000,- € 2.800,-	-€ 7,- € 1.800,- € 90,-
6 doorlatende kribben haveningang versmallen 3 zandspiraalbuizen	20%	€ 2.400,-	€ 63.000,- € 10.000,- € 60.000,-	-€ 12.800,- € 40.000,- -€ 9.800,-	-€ 425,- € 1.350,- -€ 320,-
6 doorlatende kribben haveningang versmallen 3 zandspiraalbuizen	15%	€ 1.800,-	€ 63.000,- € 10.000,- € 60.000,-	-€ 25.000,- € 28.000,- -€ 22.000,-	-€ 845,- € 920,- -€ 740,-

Tabel 7-2 Netto contante waarde drie maatregelen overnachtingshaven Haaften bij 2.000 m<sup>3</sup>/jaar baggeren als functie van de reductie van het baggervolume

Uit de kosten-baten analyse komt de versmalling van de haveningang als maatregel met de hoogste netto-contante waarde. Bij de keuze voor een maatregel spelen echter andere argumenten, criteria en belangen een rol. Te noemen zijn de scheepvaart (verbeteren in- en uitvaren, veiligheid en de duur van de aanleg van de maatregel met betrekking tot hinder voor de scheepvaart.

## 8 Monitoring

### 8.1 Algemeen

Als een van de maatregelen in de havens als pilotproject worden aangelegd, is het van groot belang het effect van de maatregelen te monitoren. In de huidige situatie is globaal bekend hoeveel sediment gemiddeld jaarlijks in de haven neerslaat. Na aanleg van de maatregel is de verwachting dat de jaargemiddelde sedimentatie reduceert. Door het geregeld peilen van de havenbodem en het meten van het sedimentgehalte in het water in de havenmond en haven, kan een indruk worden verkregen van de effectiviteit van de maatregel. De basis voor het inzicht in de effectiviteit vormt de huidige situatie in en rond de haven die moet worden vastgelegd.

Een monitoringplan wordt opgesteld voor,

- de industriehaven van de Amercentrale,
- de overnachtingshaven van Haaften,
- de jachthaven van Roermond,

en is specifiek voor de situaties rond deze drie havens opgezet. Voor de haven van Roermond is ook een monitoringplan opgezet aangezien de haven in de verkenning (Barneveld et al., 2007) is geselecteerd en de gemeente Roermond de situatie rond de haven gaan aanpakken.

Een monitoringplan geeft in principe weer wat, hoe, waar en wanneer moet worden gemeten. Het monitoren begint met het vastleggen van de huidige haven- en riviergeometrie (vorm, afmetingen, oevers, constructies, enz.). Dat gebeurt onder andere op basis van beschikbare tekeningen en/of GIS-informatie en verder door aanvullende metingen. Belangrijk daarbij is beschikbare historische informatie van met name bodempeilingen, bodemmonsters en lokale snelheidsmetingen. Het monitoringplan wordt opgesteld in overleg met de meetdiensten van Rijkswaterstaat Zuid-Holland, Oost-Nederland respectievelijk Limburg.

De monitoringplannen zijn opgesteld met als doel de huidige toestand zonder maatregel vast te leggen en de toekomstige ontwikkelingen in en rond de haven te volgen. De uit te voeren metingen, het meetgebied, de meetfrequentie, de monsternamen en –analyse, meetapparatuur en de analyse van de metingen is in de paragrafen 8.2 t/m 8.7 globaal behandeld. De monitoringplannen voor de drie havens zijn opgenomen in:

- bijlage B: monitoringplan industriehaven Amercentrale,
- bijlage C: monitoringplan overnachtingshaven Haaften,
- bijlage D: monitoringplan jachthaven Roermond.

### 8.2 Metingen

De grootheden die worden voorgesteld om te meten, zijn:

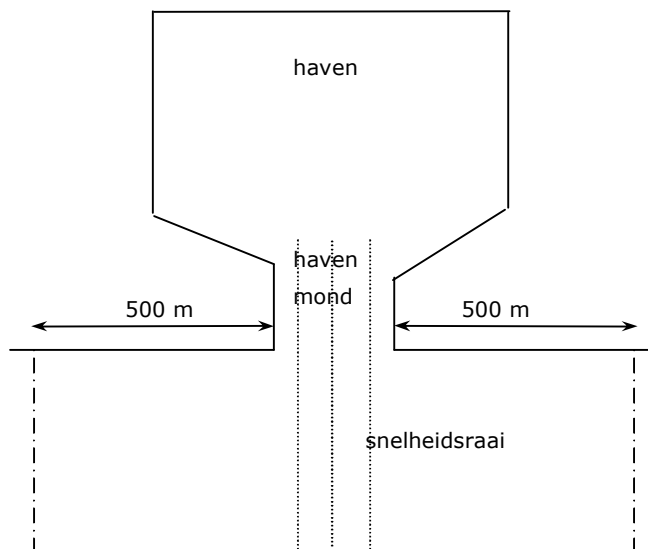
- **Bodemligging:** Gedetailleerde multi-beammetingen in riviertraject voor de haven, de havenmond en de haven.
- **Stroomsnelheden:** Meten van stroomsnelheden in de havenmond en in de rivier met een ADCP in raaien dwars op de rivieras waarmee het snelheidsverloop in de horizontale

menglaag wordt bemeten. De metingen worden bij voorkeur uitgevoerd bij een lage afvoer, een jaargemiddelde afvoer en een hoge afvoer indien die voorkomt.

- **Bodemmateriaal:** Nemen van bodemonsters in de bovenste 0,5 m van de bodemlaag in de rivier voor de havenmond, in de havenmond en in de haven in een rooster van bijvoorbeeld 25 m x 25 m (fijner in de havenmond). De korrelsamenstelling van de bodemonsters wordt bepaald.
- **Sedimentconcentratie:** Nemen van watermonsters op verschillende diepte (bijvoorbeeld 0,5 m boven de bodem, halverwege de waterdiepte en 0,5 m onder wateroppervlak) bij verschillende afvoerniveaus. De slibconcentratie van de watermonsters wordt bepaald.

### 8.3 Meetgebied

Het gebied waar de bodem moet worden gepeild en waar bodemonsters moeten worden genomen beslaat de gehele haven en een gebied in de rivier dat minstens ligt tussen de rivieras en 500 m bovenstrooms en 500 m benedenstrooms van de havenmond. De meetraaien voor de stroomsnelheden liggen dwars op de rivieras en lopen minstens door tot in de havenmond.



Figuur 8-1 Principe meetgebied rond een haven en raaien t.b.v. snelheidsmetingen

### 8.4 Meetfrequentie

In de huidige situatie worden bodemmetingen meestal uitgevoerd onder normale afvoeromstandigheden en in ieder geval voor een hoogwaterperiode. Vervolgens worden deze metingen herhaald na iedere hoogwaterperiode als met name de veranderingen in de bodemligging het grootst zullen zijn.

De frequentie van de stroomsnelheidsmetingen en watermonsters hangt af van de optredende afvoerniveaus. Het verloop van de afvoer en met name de terugkeertijd van de afvoer- en waterstandniveaus rond de haven zal kort worden geanalyseerd op te kunnen aangeven wanneer de monsters genomen moeten worden. Gestreefd wordt naar een monsternamen tijdens aan lage afvoer, een jaar-gemiddelde afvoer, eens per twee jaar voorkomend of de hoogste voorkomende afvoer in het jaar. Hoewel het moment van optreden van met name de twee laatst genoemde afvoerniveaus niet van tevoren is in te plannen, houdt dit in dat bij een

verwacht hoogwater snelheden worden gemeten en monsters worden genomen. Als na een meting een hogere afvoer voorkomt, dan wordt weer gemeten. De analyse van de terugkeertijd van afvoer en waterstand leidt tot een voorstel voor de afvoerniveaus waarbij metingen gewenst zijn, waarbij maximaal ongeveer vijf metingen per jaar worden voorzien.

## 8.5 Monsteranalyse

Bodemmonsters kunnen tijdens laagwatersituaties worden genomen en bij voorkeur ook na een hoogwaterperiode. De bodemmonsters en, indien voldoende materiaal is verzameld, het sediment uit de watermonsters worden gezeefd om de zeefkromme te bepalen. Daarmee kan onderscheid worden gemaakt in het transport van zand (grover dan 63  $\mu\text{m}$ ) en van slib (fijner dan 63  $\mu\text{m}$ ). Gekeken zal worden of het ook zinvol is om de chemische samenstelling van het sediment te bepalen. De bodem- en watermonsters worden in een daarvoor toegerust laboratorium geanalyseerd.

## 8.6 Meetapparatuur

De monitoring worden uitgevoerd door de Meetdiensten van Rijkswaterstaat. Een meetschip van de Meetdienst kan met multi-beamapparatuur de bodemligging peilen in de haven, de havenmond en de rivier. Verder kunnen snelheidsmetingen vanaf het meetschip uitgerust met een ADCP worden uitgevoerd langs de meetraaien in de havenmond. De bodemmonsters en watermonsters worden genomen teneinde de bodemsamenstelling te analyseren evenals de samenstelling van het sediment dat in het water wordt getransporteerd.

De voorgestelde metingen dienen zo goed mogelijk te passen in het schema van de Meetdienst voor de reguliere metingen in de riviertrajecten. Voor het peilen van de havenbodem is een beperkte extra inspanning benodigd tijdens de reguliere metingen. Extra fte's daarvoor moeten vooraf worden geregeld bij de facilitaire diensten van Rijkswaterstaat.

## 8.7 Analyse meetgegevens

Het analyseren van langjarige reeksen bodempeilingen geeft een indruk van de bodemontwikkelingen in het verleden. De jaarlijkse peilingen kunnen daarvoor worden gebruikt. De beschikbare bodempeilingen uitgevoerd met single-beamapparatuur kan worden omgezet naar een grid waarop de bodemligging is geïnterpoleerd. Indien nodig kan dat ook voor de multi-beampeilingen worden gedaan. Daarmee zijn langjarige bodemontwikkelingen gemakkelijker zichtbaar te maken en te kwantificeren.

Baggergegevens zijn van belang om te weten waar en hoeveel gemiddeld per jaar aanzand. Van iedere haven moet worden nagegaan of er baggercijfers bekend zijn. Met de hoeveelheid gebaggerd materiaal en de tijd tussen opvolgende peilingen, kunnen indien beschikbaar, de bodemveranderingen in en rond de havens, die uit de bodempeilingen volgen, worden vergeleken.





## 9 Conclusies en aanbevelingen

### 9.1 Conclusies

- Voor de industriehaven van de Amercentrale kunnen drie maatregelen de sedimentatie in de havenmondiging beperken,
  - versmallen haveningang en doorlatende kribben,
  - een nevengeul door de Nieuwe Dombosch,
  - zandspiraalbuizen.

Uit de kosten-baten analyse komt de versmalling en doorlatende kribben als maatregel met de hoogste netto-contante waarde.

- De verwachte sedimentatiereductie, op basis van de FINEL2D-berekeningen, is voor de versmalling van de haveningang 10% à 20%. Gecombineerd met doorlatende kribben is de verwachting dat de sedimentatiereductie 20% à 40% is.
- De verwachte sedimentatiereductie, op basis van de FINEL2D-berekeningen, is voor de nevengeul door de Nieuwe Dombosch 15% à 20%.
- De verwachte sedimentatiereductie, op basis van de FINEL2D-berekeningen, is voor de gecombineerde versmalling van de haveningang en de nevengeul door de Nieuwe Dombosch circa 30%.
- De verwachte sedimentatiereductie door toepassen van zandspiraalbuizen is circa 15% à 35%.
  
- Voor de overnachtingshaven bij Haaften kunnen drie maatregelen de sedimentatie in de havenmondiging beperken,
  - verleggen van de oeverlijn en doorlatende kribben,
  - versmallen van de haveningang,
  - zandspiraalbuizen.

Uit de kosten-baten analyse komt de versmalling als maatregel met de hoogste netto-contante waarde.

- De verwachte sedimentatiereductie voor het verleggen van de oeverlijn en het aanleggen van zes doorlatende kribben is 50% à 70%.
- De verwachte sedimentatiereductie voor de versmalling van de haveningang met een doorlatende palenrij is 20% à 40%.
- De verwachte sedimentatiereductie door toepassen van zandspiraalbuizen is circa 40% à 60%.
  
- Met FINEL2D kunnen het gewijzigde stromingspatroon door maatregelen worden onderzocht evenals de reductie van de sedimentaanvoer in havens. De maatregelen moeten dan wel typische twee-dimensionale diepte-gemiddelde stroomvelden beïnvloeden. Drie-dimensionale stromingspatronen zoals werverstraten en spiraalstroming kunnen niet door FINEL2D worden berekend.

## 9.2 Aanbevelingen

- Voor de Amerhaven is de eenvoudigste maatregel het plaatsen van vijf doorlatende kribben bovenstrooms van de haveningang. Belangrijk is dat deze maatregel relatief eenvoudig is en bij meerdere havens kan worden toegepast. Het monitoren van het effect van de kribben op het stroombeeld en de sedimentatie, levert zeer nuttige informatie op over de werking van de kribben in de praktijk. Hoewel de verwachting is dat stroomsnelheden langs de oever laag zijn, kan de maatregel voor deze situatie worden onderzocht. Ook het verstoppert van de kribben met sediment of drijvend vuil tijdens lage en hogere afvoeren kan worden gevolgd.
- Voor de overnachtingshaven bij Haaften is de aanleg van drie zandspiraalbuizen een interessante maatregel. De stroomsnelheden voor de havenmond zijn hoog genoeg en de drukke scheepvaart heeft nauwelijks last van deze maatregel. Als pilotproject is deze maatregel uiterst geschikt om dit type maatregel te onderzoeken, mede gezien het (bodem)transport dat voornamelijk uit zand bestaat.
- Andere argumenten, criteria en belangen spelen ook een belangrijke rol bij de keuze voor een maatregel. Te noemen zijn de scheepvaart, veiligheid, de duur van de aanleg van een maatregel, de hinder die de aanleg met zich meebrengt voor scheepvaart en walgerelateerde activiteiten. De keuze van de uiteindelijke uit te voeren maatregel wordt bepaald door de gebruikers en beheerder van de haven en door de overige belanghebbenden.
- In FINELD kunnen doorlatende constructies (palenrijen) worden geschematiseerd op een wijze die in het verleden door WL is onderzocht. In het rapport van Flokstra en Van Schijndel (2002) is een methode aangegeven en getest die goede resultaten oplevert vergeleken met schaalmodelproeven. Aanbevolen wordt die methode voor de Amerhaven voor de doorlatende kribben toe te passen.
- Voor de instelling van de viscositeit in FINEL2D wordt aanbevolen de resultaten van de schaalmodelproeven te gebruiken die zijn uitgevoerd in 2007 in het Vloeistoflaboratorium van de TU Delft. Een rekenmodel van de proefopstelling kan inzicht geven in de benodigde viscositeit van het twee-dimensionale stromingsmodel om het diepte-gemiddelde stroombeeld, dat in het schaalmodel is opgetreden, voldoende nauwkeurig na te rekenen.
- De opgestelde monitoringplannen voor de drie havens (Amerhaven, Haaften en Roermond) zouden zo snel mogelijk moeten worden geactiveerd. Het monitoren (meten bodemligging, snelheden, concentraties) van de huidige situatie is een eerste vereiste. De huidige situatie dient als referentiesituatie waarmee later, na uitvoeren van de maatregel, het effect van de maatregel op het stroombeeld en de sedimentatie kan worden afgeleid uit de metingen.

## 10 Referenties

- Barneveld H.J., B. van Prooijen, P. Termes. Reductie sedimentatie in havens. Onderzoek naar kansrijke oplossingen. HKV LJN IN WATER, Svašek en SRE. Rapportnr. PR1208. April 2007.
- Broekhuizen A. (2002). Oriënterend onderzoek waterbodemb Bergsche Maas. De Straat Milieuadviseurs, Delft. December 2002.
- CSO. Waterbodemonderzoek invaart vluchthaven bij Haaften. CSO Adviesbureau voor milieuonderzoek, Arnhem. Rapportnr. 00.A034. 12 december 2000.
- DZH. Waterbodembemonstering Amer en inloop Donge en Spijkerboor. Rijkswaterstaat Zuid-Holland Meetdienst. 2002.
- Flokstra C., S. van Schijndel. Innovatieve kribben met palenrijen (incl. aanvullende memo van 29/07/2002). Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde. Rapportnr. Q3101. Juni 2002.
- Grontmij. Uitwijkhaven Haaften. Projectnota (concept). Grontmij, de Bilt. 23 september 2007.
- GWV. Kosten Kust- en oeverwerken, remming-, aanleg- en geleidewerken. Elsevier. 2005.
- MH. Waterbodemonderzoek. Invaart vluchthaven te Haaften. MH Nederland B.V. Projectnr. W02.121.v1. Februari 2003.
- Moges M.M. Application of zandspiraalbuizen in the river Rhine. Unesco-IHE, Delft. MSc Thesis (WSE-HERBD-06-16). June 2006.
- Van Rijn L.C. Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport. (Thesis). Delft Hydraulics Communication no. 382. 1987.
- Van Schijndel S. en C. Kranenburg. Aanslibbing van een rivierhaven. Vermindering door aanpassing van de vormgeving van jachthavens 't Steel en La Bonne Aventure. Technische Universiteit Delft. Faculteit der Civiele Techniek. Rapportnr. 2-97. 1997.
- Verhoeven. Slibbemonstering overnachtingshaven Haaften. Verhoeven Milieutechniek B.V., Velddriel. Briefnr. B02.1634. 10 april 2002.



## **Bijlagen**



## Bijlage A: Beschikbare gegevens

### A.1 Beschikbare gegevens industriehaven Amercentrale

Van de industriehaven bij de Amercentrale langs de Bergsche Maas zijn de volgende gegevens beschikbaar:

- informatie over de afmetingen van de haven,
- informatie over de scheepvaart in de haven,
- de koelwaterinname door de Amercentrale,
- waterstanden en afvoeren in de Maas,
- bodempeilingen in de haven en in de mond van de Donge en Bergsche Maas,
- bodemsamenstelling in de rivier en havenmonding,
- gebaggerde hoeveelheden in de havenmonding,
- resultaten waterbodemonderzoek in de Bergsche Maas,
- verdeling aandeel zand, slib en organisch materiaal langs de Bergsche Maas en Amer,
- concentratie zwevend materiaal in de Bergsche Maas en Amer.

#### A.1.1 Algemene informatie

De Amerhaven is rond 1946 gegraven toen de Amercentrale is gebouwd. Daarvoor was er de Dongecentrale die aan de Donge ligt en nog geregeld wordt ingezet. De Amercentrale begon met enkele eenheden die na enkele tientallen jaren werden vervangen. Momenteel zijn de eenheden Amer 8 en Amer 9 operationeel. Men denkt na over een nieuwe eenheid Amer 10 die over circa 5 jaar gebouwd zou kunnen gaan worden.

De industriehaven van de Amercentrale heeft globaal de volgende afmetingen: de breedte is 335 m, de lengte 525 m en het oppervlak is 17,5 ha. De opening tussen de Bergsche Maas en de Donge is 185 m en de havenopening is 120 m breed. Het gebied rond de haven Amercentrale en de koelwaterstromen zijn in Figuur A-1 weergegeven.

Langs de industriehaven is een loswal aangelegd voor het lossen van kolen en kolenschepen kunnen in de haven worden afgemeerd. Het kan zijn dat de haven oorspronkelijk ook bedoeld is als 'zandvang' voor het water vanuit de rivier dat via de haven naar de koelwaterinnamepunten stroomt. In de zuidwesthoek van de haven zijn meerdere koelwaterinlaten operationeel geweest. Momenteel (2007) is er nog één koelwaterinnamepunt in de haven operationeel. Aan de zuidoost kant van de haven is een jachthaven aanwezig ten behoeve van het personeel van de centrale.



Figuur A-1 Overzicht industriehaven bij Amercentrale met koelwaterinlaten en -uitlaat

### A.1.2 Scheepvaart

Dagelijks varen schepen met kolen en biomassa vanuit Rotterdam naar de centrale en meren af in de haven. Per dag komen gemiddeld 4 bakken met kolen of biobrandstof de haven in. Midden in de haven liggen duwbakken afgemeerd met kolen en biobrandstof (à 3000 tot 3500 ton). De bakken met kolen worden langs de loswal in de haven gelost (Figuur A-2, links). De bakken met biobrandstof worden aan de loswal langs de rivier gelost (Figuur A-2, rechts). Verder varen pleziervaartuigen van het personeel de haven in en uit naar de jachthaven in de zuidoosthoek van de haven. Er worden geen andere (niet-)commerciële havengerelateerde activiteiten ontplooid.

Het is voor de bakken (vier bakken 2 aan 2) lastig om de haven in en uit te varen. De stroming op de rivier is sterk en als de voorkant van de bak in de Dongemonding steekt of in de haven, ondervindt de achterzijde nog de kracht van de stroming. Van ondiepte hebben de bakken geen last, al zit er soms een bak vast op de ondiepte in de rivier net voor de haveningang. Beperken van de breedte van de haveningang is ongewenst, de scheepvaart heeft de ruimte hard nodig.





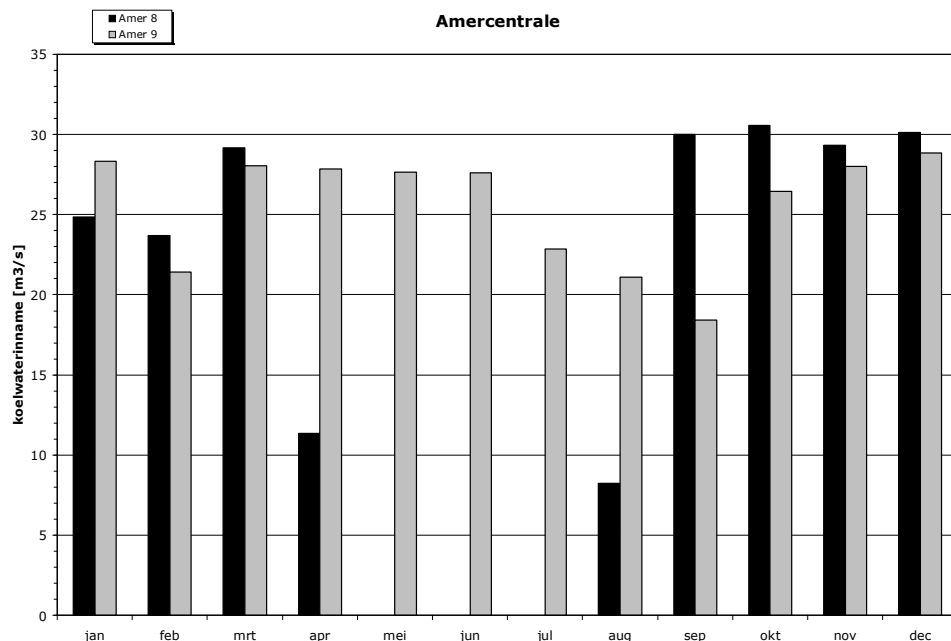
Figuur A-2 Lossen van schepen langs de loswallen

### A.1.3 Koelwaterstromen

Koelwaterinname voor de centrale vanuit de Bergsche Maas vindt plaats op twee locaties, zie Figuur A-1:

- Amer 8, inname vanuit de haven met een maximaal koelwaterdebiet van 29,4 m<sup>3</sup>/s,
- Amer 9, inname vanuit de Bergsche Maas met een maximaal koelwaterdebiet van 30,1 m<sup>3</sup>/s.

Uit de koelwater innamecijfers van 2006 blijkt dat in de maanden januari t/m maart en september t/m december de koelwatercapaciteit van de inlaat voor Amer 8 vrijwel volledig wordt benut. In de maanden april t/m augustus is de inname vrijwel nihil, zie Figuur A-3. Dus juist in de maanden met een kans op hogere rivierafvoeren en meer sedimenttransport, wordt vrijwel continu circa 30 m<sup>3</sup>/s door de centrale (Amer 8) via de haven ingenomen.



Figuur A-3 Koelwaterinname van de eenheden 8 en 9 van de Amercentrale in 2006



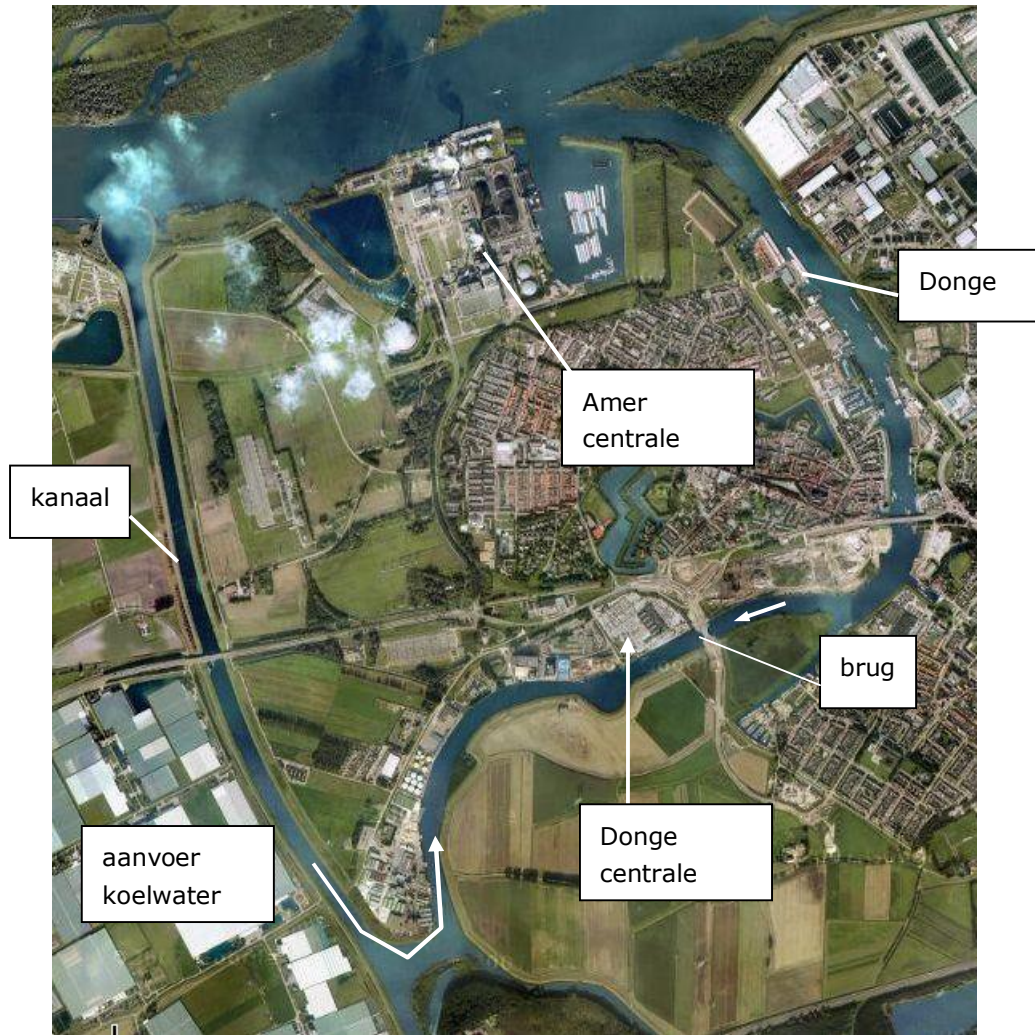
Figuur A-4 Jachthaven en koelwaterinlaat in haven

Als Amer 10 wordt gebouwd betekent dat, dat er waarschijnlijk 30 à 45 m<sup>3</sup>/s extra koelwater door de oude inlaten van Amer 5 en 6 de haven ingetrokken wordt. De totale inname kan dan oplopen tot 60 tot 75 m<sup>3</sup>/s via de haven, hetgeen een vergelijkbare situatie is met 15 jaar geleden toen er nog meer eenheden in bedrijf waren. Meer koelwaterinname heeft gevolgen voor de baggerfrequentie en -kosten. Het lijkt geen twijfel dat het in het belang van Essent is dat er een structurele oplossing voor de sedimentatieproblematiek gezocht wordt. Met name omdat het niet kunnen innemen bij één van de twee innamepunten momenteel leidt tot een kostenpost van circa 500 k€ en hierin zijn de extra kosten voor opstarten en optredende warmteverliezen niet meegerekend.

De Dongecentrale, zie Figuur A-5, neemt ook koelwater in, 15 m<sup>3</sup>/s gemiddeld gedurende de helft van het jaar. Het water stroomt via de Donge toe, maar door de brug over de Donge met nauwe opening, gaat het water voornamelijk via het Kanaal naar de Amer naar de Dongecentrale.

De vragen die niet beantwoord zijn:

- Hoeveel van het koelwater gaat via de Dongemonding naar de Dongecentrale en hoeveel via het kanaal? En kan er een significant debiet onder de brug over de Donge stromen?
- Waar gaat het koelwater van de Dongecentrale heen? Ligt er een lange buis naar het uitlaatkanaal dat door de Amercentrale wordt gebruikt of is er een ander lozingspunt?



Figuur A-5 Overzicht van de locaties van de Amercentrale en Donge centrale

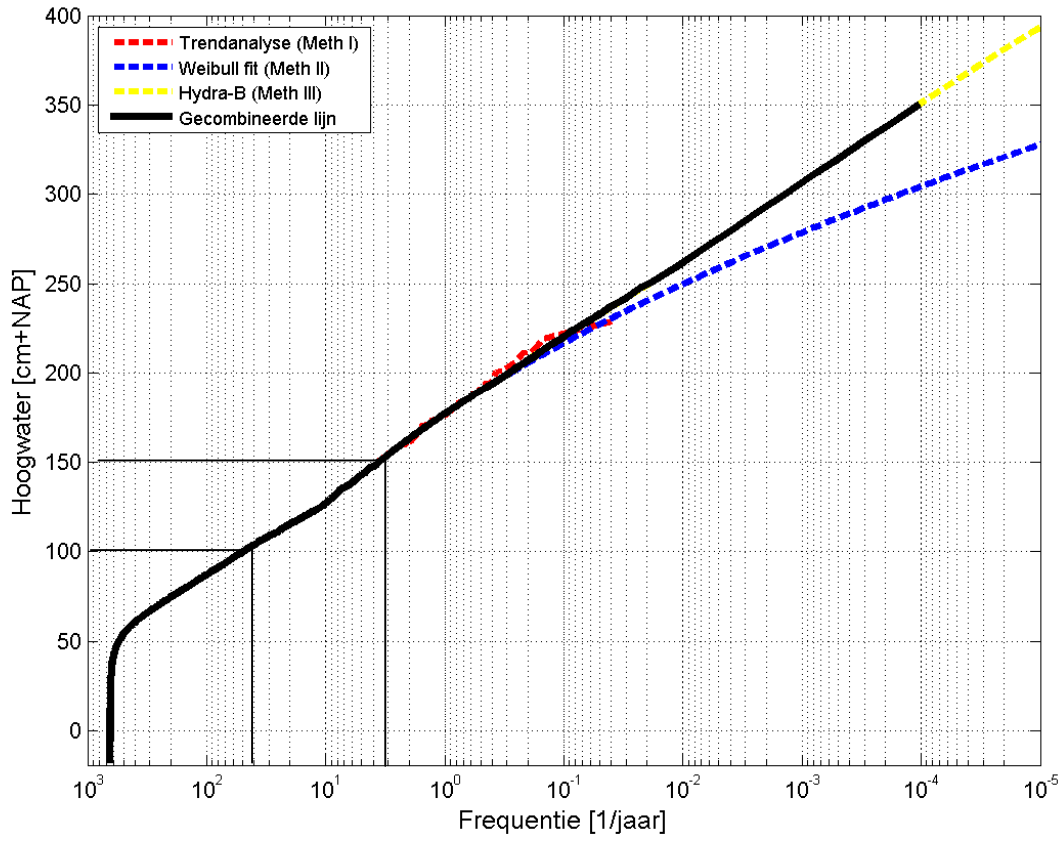
#### A.1.4 Rivierwaterstanden en afvoeren

De frequentielijn van de optredende waterstanden in de Bergsche Maas bij Keizersveer, km 247.5 is in Figuur A-6 weergegeven. De Amerhaven ligt nabij km 251. Het maaiveld langs de Bergsche Maas in het traject nabij de Amerhaven ligt globaal tussen NAP+1 m en NAP+1,5 m, zie Figuur A-7. De uiterwaard innundeert dus met een frequentie tussen de 3 en 40 keer per jaar.

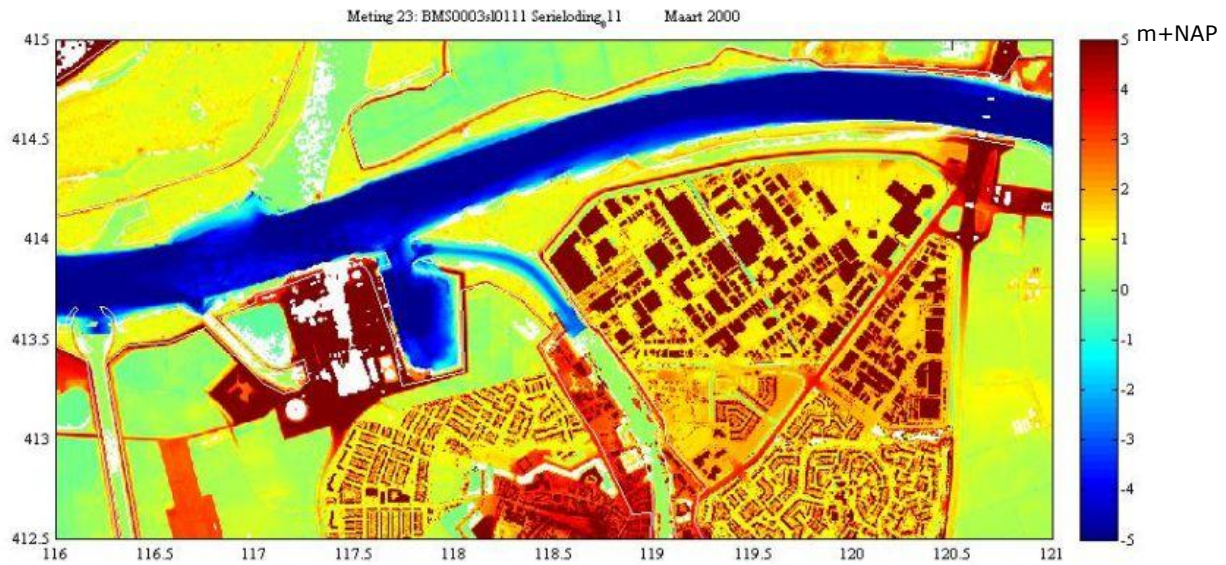
De overschrijdingsfrequentie van de afvoer bij Keizersveer, zie Figuur A-8, is bepaald op basis van een afvoerreeks over de periode 1997-2005. De afvoeren zijn met het SOBEK-model van de Maas gegenereerd. De berekeningen met FINEL2D zijn uitgevoerd voor de volgende afvoeren met bijbehorende overschrijdingsfrequentie,

- 100 m<sup>3</sup>/s 300 dagen per jaar overschreden,
- 300 m<sup>3</sup>/s 130 dagen per jaar overschreden,
- 1500 m<sup>3</sup>/s 3 dagen per jaar overschreden.

De gemiddelde afvoer op de Bergsche Maas is 320 m<sup>3</sup>/s.



Figuur A-6 Frequentieverdeling waterstand in de Bergsche Maas bij Keizersveer



Figuur A-7 Bodemligging uit peiling maart 2000



Figuur A-8 Frequentieverdeling afvoer in de Bergsche Maas bij Keizersveer

**A.1.5 Bodempeilingen**

Jaarlijks wordt de rivierbodem gepeild tot de NAP-4 m lijn inclusief de Dongemonding. Sinds 2004 à 2005 met multi-beamapparatuur, daarvoor met single-beamapparatuur. De ingang van de Amerhaven verzand met name tijdens hoogwaters en er wordt dan ook altijd op diverse locaties gepeild. Het onderhoudsbaggerwerk van de vaarweg in de Bergsche Maas en Amer gebeurt gemiddeld eens per vijf jaar. In de tweede helft van 2007 is onderhoudsbaggerwerk uitgevoerd in het riviertraject rond de haveningang tot aan de monding van het Kanaal naar de Amer en tot in de Spijkerboor, zie Figuur A-9.



Figuur A-9 Gebied waarin 2007 is gebaggerd in de Bergsche Maas

Een bodempeiling in de haven uit april 2005 is beschikbaar, zie Figuur A-10. Uit de bodempeilingen is op te maken dat zich voor de haveningang in de rivier een ondiepte bevindt. De vaarweg vanuit de rivier tot de haven is duidelijk zichtbaar als een diepere geul. Ook de locaties midden in de haven aan de westzijde waar de schepen draaien, is zichtbaar als lokale diepte (ten gevolge van de schroefstraal). Voor de waterinlaat is het ondiep evenals langs de oostelijke oever van de haven.

Vroeger (15 jaar geleden) werd er jaarlijks gebaggerd in de havenmond, nu is dat gemiddeld eens per twee jaar. Dit is mogelijk het effect van het verdwijnen van de getijwerking na ingebruikname Haringvlietsluizen of van de sloop van Amer 5 en 6 die vroeger 40 à 60 m<sup>3</sup>/s (extra) water in de haven onttrokken en daarmee ook sediment werd meegevoerd de haven in. Volgens Essent is het slib in de haven niet verontreinigd. De opwoelling in de haven door scheepvaart en stroming moet minimaal zijn in verband met de koelwaterinlaat aan het eind van de haven.



Figuur A-10 Bodempeiling industriehaven Amercentrale, april 2005

In Rijkswaterstaat (2001) staan de resultaten van bodempeilingen, hier niet getoond (niet digitaal beschikbaar), die laten zien dat het niveau van de rivierbodem van de Bergsche Maas ter plaatse van de haveningang in opeenvolgende jaren verandert, zie Tabel A-1.

peiling in jaar	bodemniveau van ... tot	verandering bodemniveau	over de periode
1970	NAP-7 m tot NAP-8 m	-	-
1976	NAP-5 m tot NAP-7 m	+1 m à +2 m	1970-1976
1981	NAP-3 m tot NAP-4 m	0 m à -0,5 m	1976-1981
1985	NAP-4 m tot NAP-5 m	0 m à -0,5 m	1981-1985
1990	NAP-4 m tot NAP-5 m	0 m à -0,5 m	1985-1990
1995	NAP-4 m tot NAP-5 m	0 m à +0,5 m	1990-1995
1996	NAP-4 m tot NAP-5 m	-0,5 m à -1 m	1995-1996

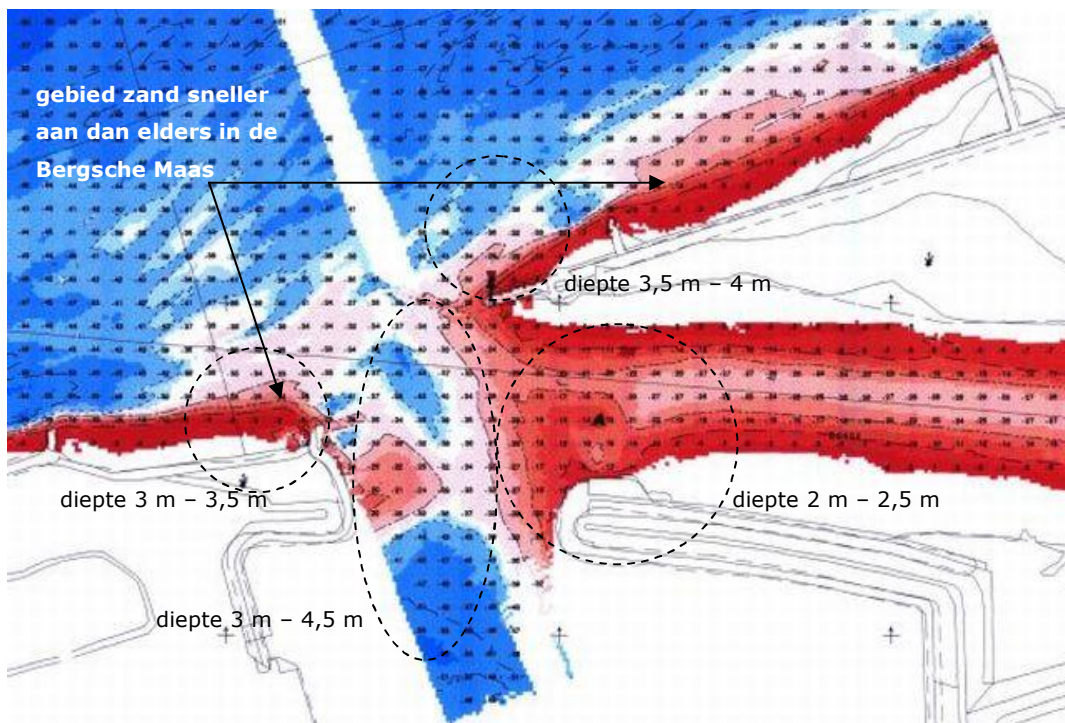
Tabel A-1 Grootchalige bodemwijziging in Bergsche Maas voor de haven Amercentrale, 1970-1996

De gegevens zijn te grof om de mate van aanzanding of bodemerrosie te bepalen in de haveningang. Wel is te concluderen dat vanaf ongeveer 1970 het bodemniveau omhoog is gegaan. De oorzaak daarvan moet gezocht worden in de afsluiting van het Haringvliet in november 1970.

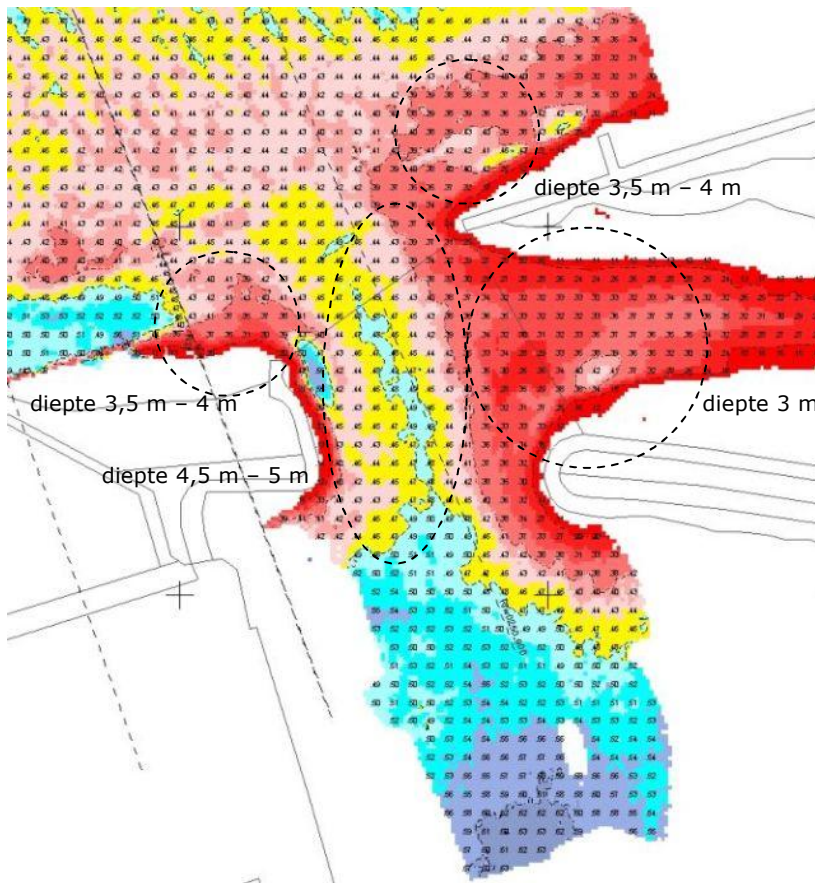
Recentere bodempeilingen in de Bergsche Maas en in de havenmonding laten het volgende patroon zien, zie de Figuren A-11 t/m A-13,

- Tussen 2002 en 2005 is gebaggerd in de havenmonding en Dongemonding aangezien de dieptes in die periode zijn toegenomen met circa 0,5 m.
- Tussen 2005 en 2006 is weinig verschil te zien, alleen lijkt de ondiepte aan de westzijde van de haveningang iets te zijn toegenomen.

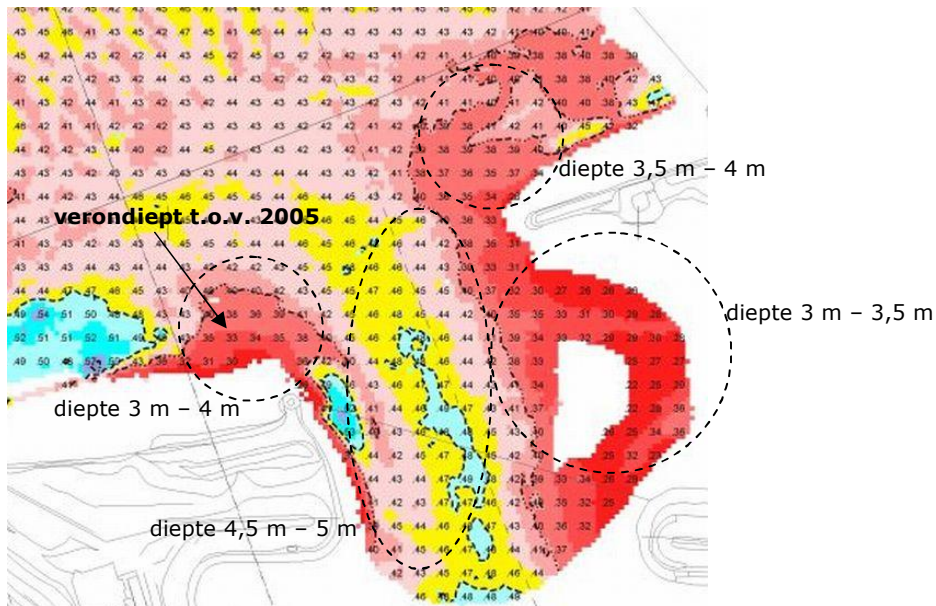
Verder is door de meetdienst van Rijkswaterstaat Zuid-Holland meegedeeld dat de locaties in de Bergsche Maas aan de oost- en westzijde van de haveningang sneller aanzanden dat in andere gedeelten van de Bergsche Maas, zie Figuur A-11.



Figuur A-11 Bodempeiling in havenmonding, 2002



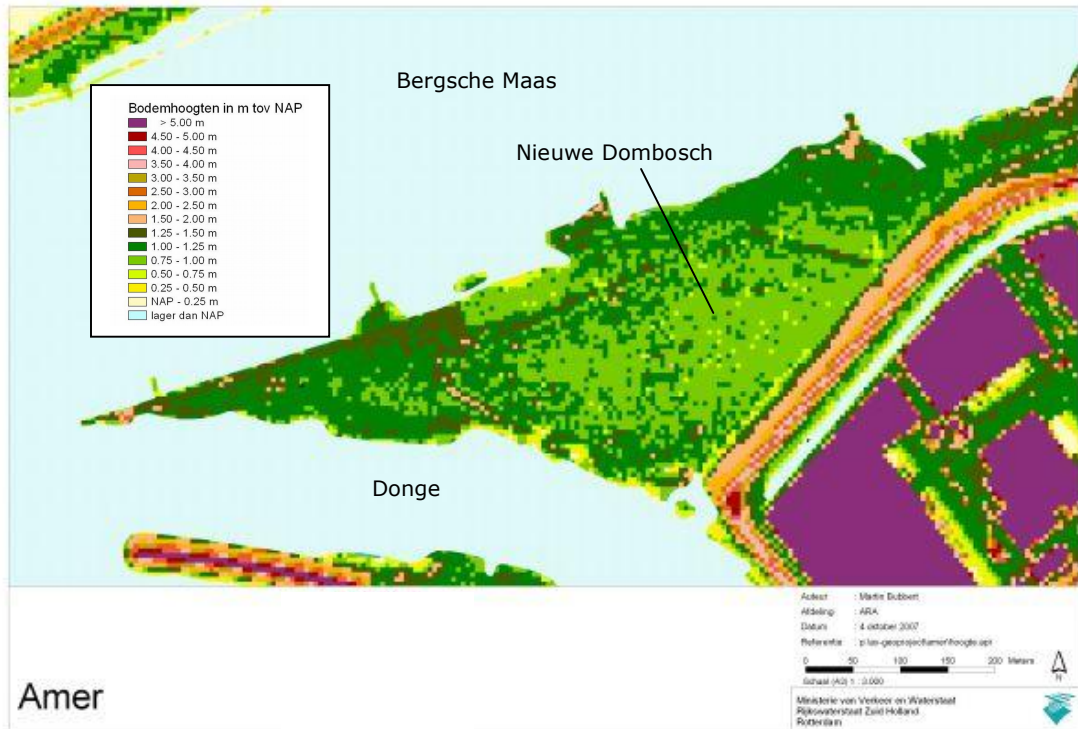
Figuur A-12 Bodempeiling in havenmond, 2005



Figuur A-13 Bodempeiling in havenmond, 2006

In Figuur A-14 is de bodemligging gepeild in 2007 weergegeven in de Nieuwe Dombosch, een buitendijksgebied bebost gebied bovenstrooms van de Dongemonding. Langs de hoofdgeul is het niveau ongeveer NAP+1,5 m en langs de primaire kering is het bodemniveau ongeveer NAP+1 m.





Figuur A-14 Bodemniveau in de Nieuwe Dombosch

**A.1.6 Bodemsamenstelling**

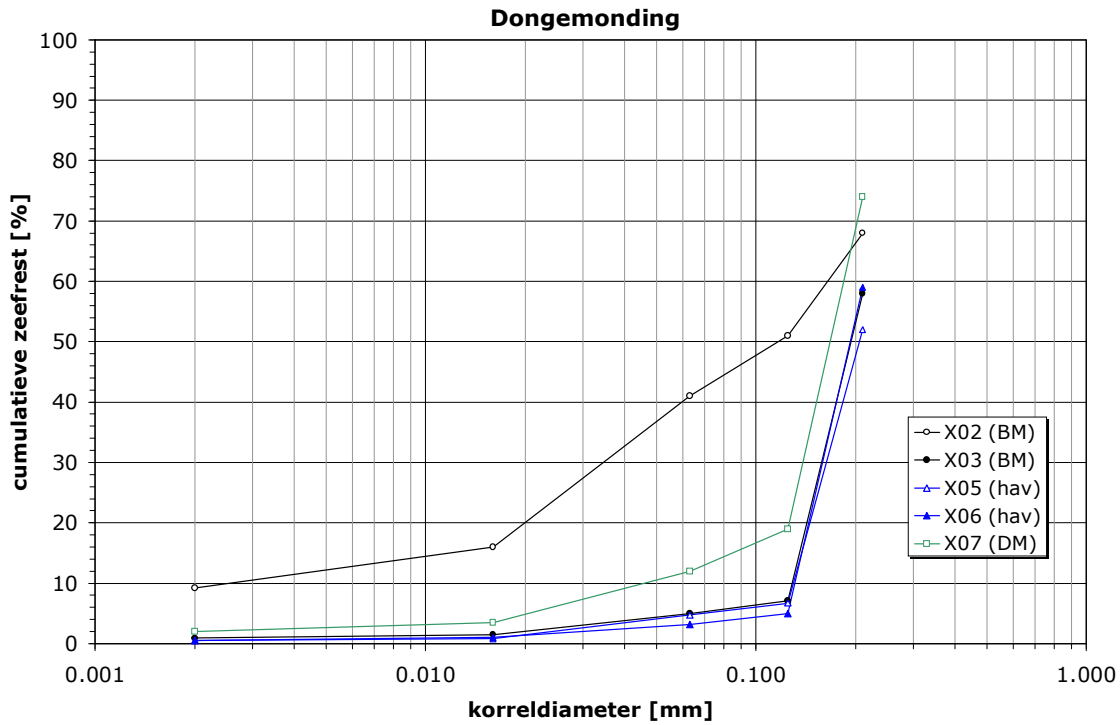
Uit de resultaten van een waterbodemonderzoek uitgevoerd in 2002 (DZH, 2002) is de korrelverdeling van het bodemmateriaal voor de Amerhaven overgenomen. Op de monsterlocaties weergegeven in Figuur A-15 zijn over een diepte van 0,35 m bodemonster gestoken. Het monster is gemengd en de korrelverdeling is geanalyseerd evenals de chemische samenstelling. Het resultaat is samengevat in Figuur A-16 en A-17 en Tabel A-2. De korrelverdeling grover dan 210 µm is niet apart in het analyserapport weergegeven.



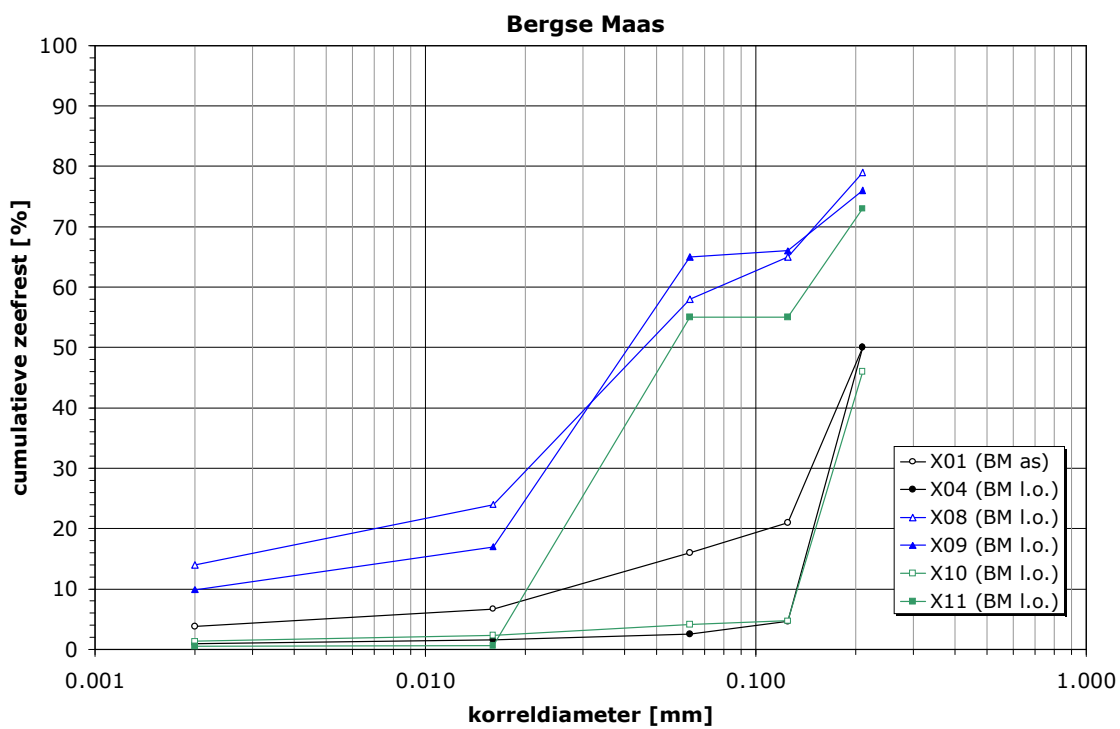
Figuur A-15 Locaties bodemonsters in de Bergsche Maas en Donge voor de haveningang Amercentrale

	meetlocatie										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
D10 [ $\mu\text{m}$ ]	33	4	130	135	131	133	52	2	2	136	24
D50 [ $\mu\text{m}$ ]	210	119	197	210	206	196	173	52	48	210	59

Tabel A-2 Overzicht D10 en D50 bodemonsters op 11 locaties voor de haveningang Amercentrale



Figuur A-16 Zeefkromme bodemmateriaal in de Dongemonding



Figuur A-17 Zeefkromme bodemmateriaal in de Bergsche Maas

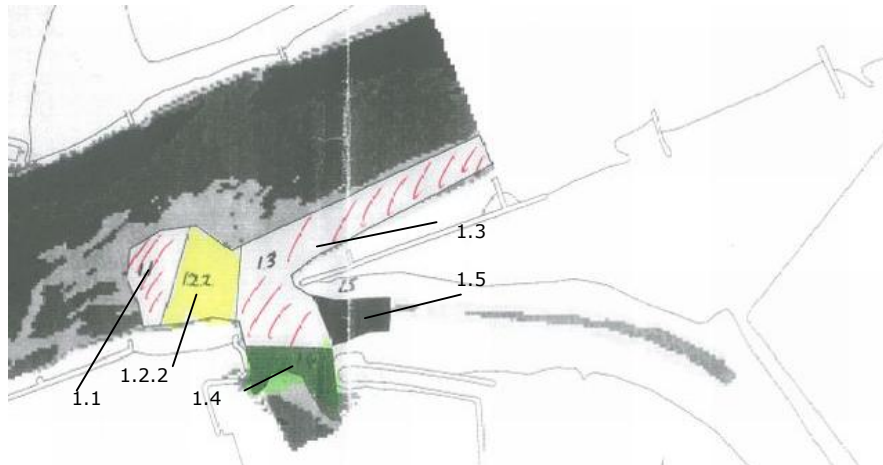
### A.1.7 Baggerhoeveelheden

Met de gebaggerde hoeveelheden is beter te schatten hoeveel aanzanding of aanslibbing per jaar is te verwachten. In 2002 is circa 63.000 m<sup>3</sup> in en buiten de monding van de haven Amercentrale gebaggerd, zie Figuur A-19. De gebaggerde hoeveelheden per deelgebied zijn:

- gebied 1.1, linkeroever Bergsche Maas benedenstrooms haveningang: 357 m<sup>3</sup>,
- gebied 1.2.2, linkeroever Bergsche Maas benedenstrooms haveningang: 3.856 m<sup>3</sup>,
- gebied 1.3, linkeroever Bergsche Maas bovenstrooms en havenmond: 35.976 m<sup>3</sup>,
- gebied 1.4, in de haveningang: 9.528 m<sup>3</sup>,
- gebied 1.5, in de Dongemonding: 13.444 m<sup>3</sup>.

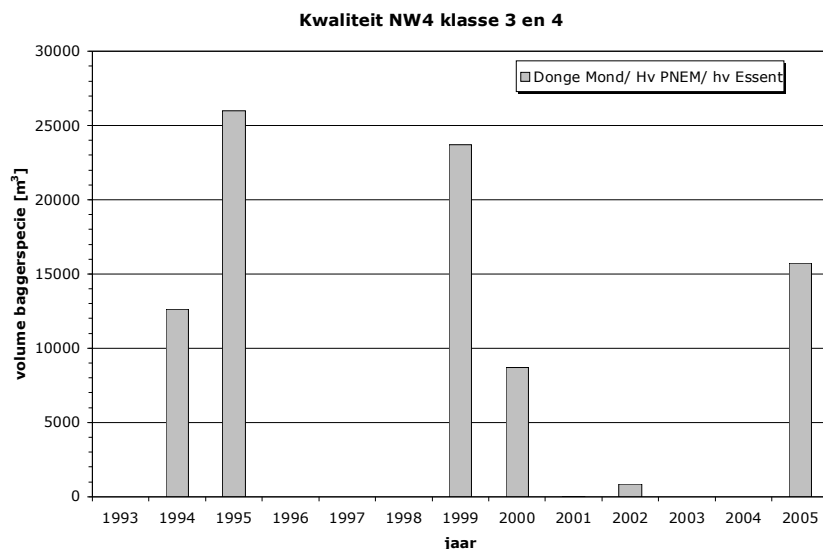
Door de beheerder (Rijkswaterstaat Zuid-Holland) is aangegeven dat deze hoeveelheden over een periode van 3 tot 5 jaar zijn gebaggerd. Gemiddeld is dat 12.500 m<sup>3</sup>/jaar tot 21.000 m<sup>3</sup>/jaar. In de haveningang (gebied 1.4, 1.5 en 30% van 1.3) is de baggerhoeveelheid 7.000 m<sup>3</sup>/jaar tot 11.000 m<sup>3</sup>/jaar.

Opmerking: Het zand en slib dat in de havenmonding neerslaat en bezinkt, komt uit de Amer en de Bergsche Maas. Er is geen transport van zand of slib vanuit de Merwedede naar de haven Amercentrale.



Figuur A-19 Baggerlocaties in 2002

De gegevens laten zien dat de aanzanding en aanslibbing van de bodem voornamelijk plaatsvindt langs de linkeroever van de Bergsche Maas voor de ingang naar de Donge en haven (gebied 1.3) en in de Dongemonding (gebied 1.5) en haveningang (gebied 1.4).



Figuur A-20 Hoeveelheden vervuilde baggerspecie rond de haven Amercentrale

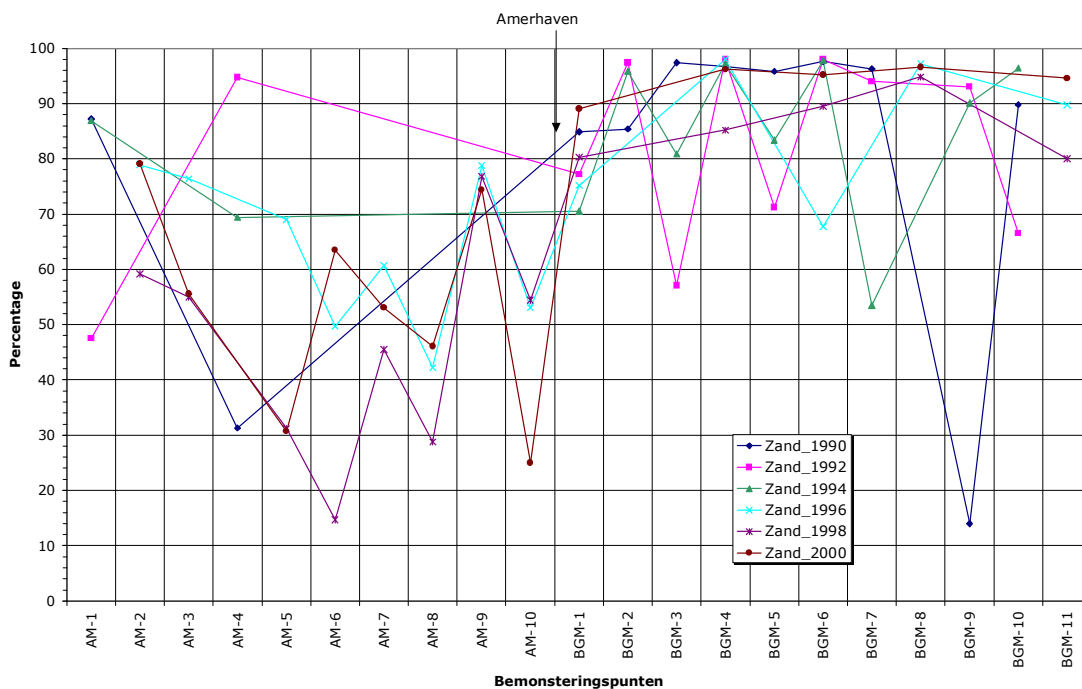
Informatie over de gebaggerde hoeveelheden verontreinigde baggerspecie tussen 1994 en 2005 geeft inzicht in de hoeveelheid klasse 3 en 4 baggerspecie die rond de Amerhaven voorkomt, zie Figuur A-20. Gemiddeld is over de periode 1994-2005 per jaar een hoeveelheid van 6.800 m<sup>3</sup> verontreinigde specie gebaggerd, ten opzichte van 7000 tot 11000 m<sup>3</sup>/jaar baggervolume in de havenmond. Opgemerkt wordt dat er gebaggerd lijkt te zijn na het optreden van een hoge(re) afvoer van de Maas. Dit zou er op wijzen dat aanslibbing voornamelijk optreedt na een (significant) hoge afvoer.

**A.1.8 Waterbodemonderzoek**

De kwaliteit van het bodemmateriaal is onderzocht en de resultaten van het onderzoek zijn beschreven in Broekhuizen (2002). Uit de analyse van de boringen, uitgevoerd langs de beide oevers van de Bergsche Maas en Amer, blijkt dat voor de haveningang nauwelijks verontreinigde grond aanwezig is. Het bodemmateriaal is op die locatie klasse 0 of klasse 1. De verontreinigingen die in de havenmond bezinken, komen dus van elders, zie Figuur A-20. Stroomopwaarts in de Bergsche Maas komen wel verontreinigingen met klasse 3 en klasse 4 in de bodem voor.

**Verdeling zand, slib en organische stof**

De verdeling van de hoeveelheden zand, slib en organische stof langs een traject van de Bergsche Maas en de Amer is over verschillende jaren bekend. Met deze informatie kan worden bepaald wat de samenstelling is van het sediment dat de haveningang passeert en mogelijk in de haven achterblijft.

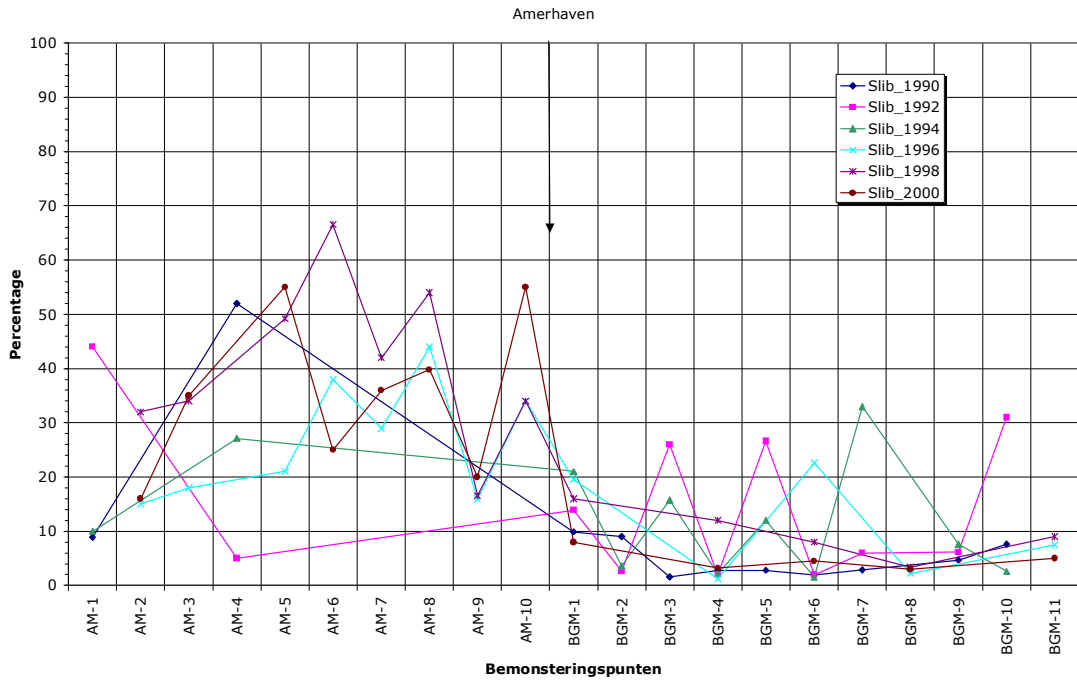


Figuur A-21 Aandeel zand langs de Bergsche Maas en Amer

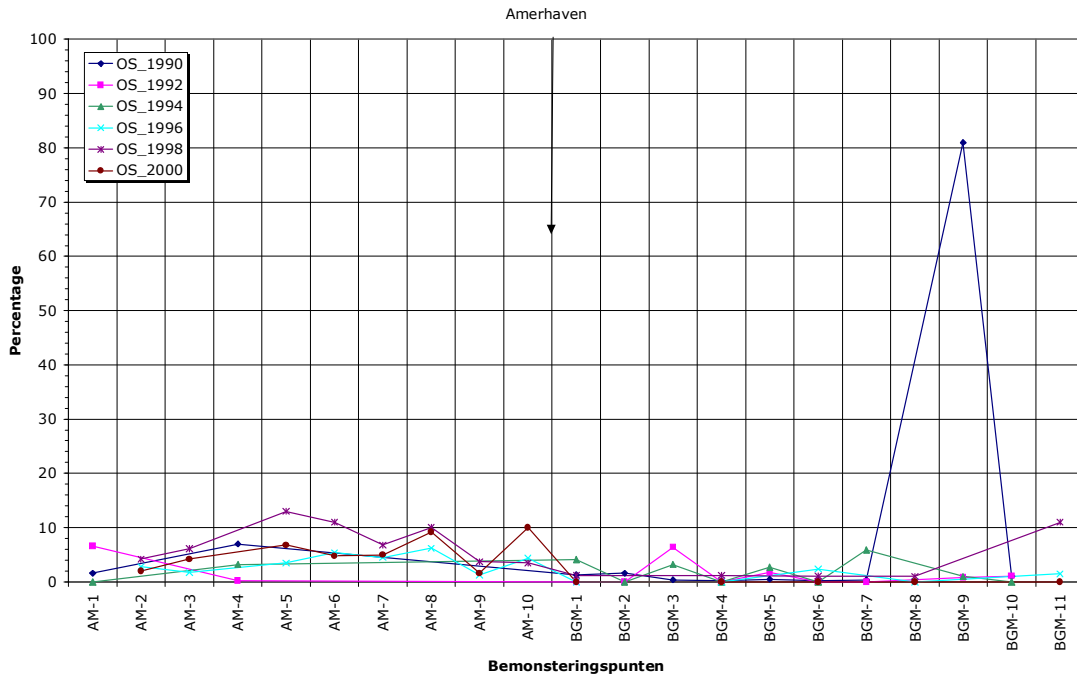
Het aandeel zand in de bodem van de rivier rond de haven Amercentrale is over de jaren gezien circa 70%, zie Figuur A-21. Het aandeel slib over die periode op die locatie is circa 30%, zie Figuur A-22. Het aandeel organische stoffen in de bodem is minder dan 5%, zie Figuur A-23.

Uit informatie van de rivierbeheerder volgt dat de samenstelling van het gebaggerde materiaal in de Donge- en havenmond ongeveer 50% zand is en 50% slib en dat de meeste

aanzanding en aanslibbing in de havenmonding optreedt tijdens situaties met een hoge afvoer van de Maas.



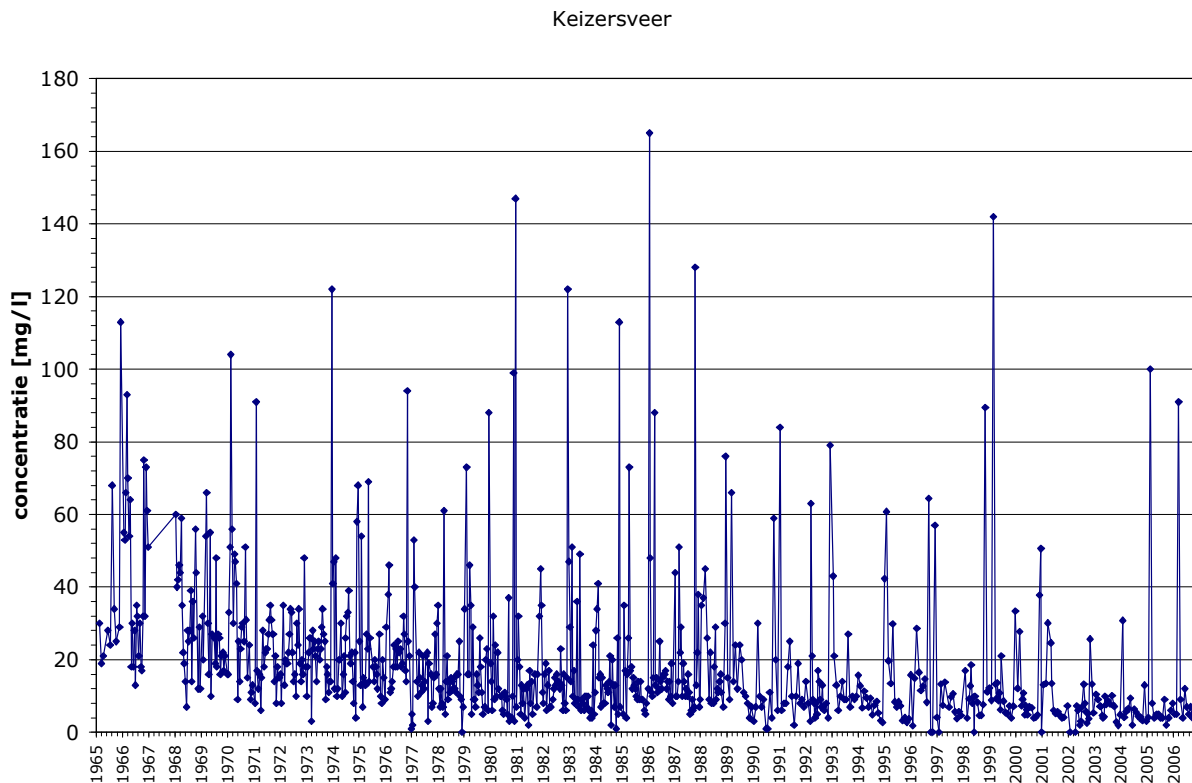
Figuur A-22 Aandeel slib langs de Bergsche Maas en Amer



Figuur A-23 Aandeel organische stoffen langs de Bergsche Maas en Amer

**A.1.9 Concentratie zwevend materiaal**

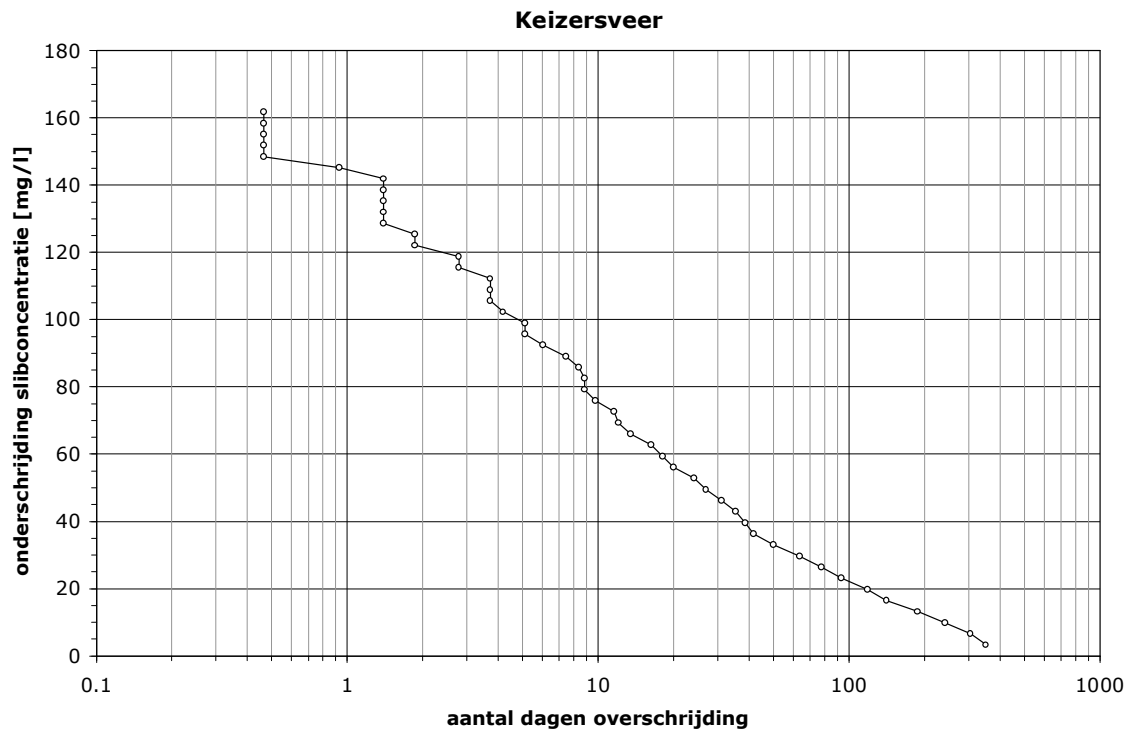
De concentratie van zwevend materiaal (met name slib) in de Bergsche Maas en Amer is op enkele locaties gedurende een aantal jaren gemeten. Bij Keizersveer is een vaste meetlocatie waar over de periode 1965-2006 meetgegevens beschikbaar zijn, zie Figuur A-24. Over de jaren is een dalende tendens zichtbaar in de concentraties die mogelijk het gevolg is van de afsluiting van de Haringvliet in november 1970. Bij situaties met een hoge rivierafvoer kan de concentratie oplopen tot meer dan 100 mg/l, gemiddeld over het jaar is de concentratie circa 10 mg/l. De enkele beschikbare metingen uit 2006 bij Geertruidenberg (niet getoond), 3 km bovenstrooms, spreken dit niet tegen.



Figuur A-24 Concentratie zwevend materiaal bij Keizersveer 1965-2006

De overschrijdingsfrequentie van de slibconcentratie gemiddeld per maand is in Figuur A-25 weergegeven. Uit de kromme die gebaseerd is op de periode 1965-2006 volgt dat de gemiddelde concentratie van 20 mg/l ongeveer 120 dagen per jaar wordt overschreden. Een maandgemiddelde slibconcentratie van 50 mg/l wordt ongeveer 25 dagen per jaar overschreden en een slibconcentratie van 100 mg/l ongeveer 5 dagen per jaar. Eén dag per jaar wordt een slibconcentratie van 145 mg/l overschreden. Uit de frequentieverdeling van de afvoer bij Keizersveer, zie Figuur A-8, volgen de bijbehorende afvoeren die met de gemiddelde slibconcentraties tot de volgende gemiddelde slibvrachten leiden:

- 120 dagen per jaar overschreden 20 mg/l en 330 m<sup>3</sup>/s, slibvracht 6 kg/s (500 ton/dag),
- 25 dagen per jaar overschreden 50 mg/l en 850 m<sup>3</sup>/s, slibvracht 43 kg/s (3.500 ton/dag),
- 5 dagen per jaar overschreden 100 mg/l en 1350 m<sup>3</sup>/s, slibvracht 135 kg/s (11.500 ton/dag),
- 1 dag per jaar overschreden 145 mg/l en 1870 m<sup>3</sup>/s, slibvracht 270 kg/s (23.500 ton/dag).

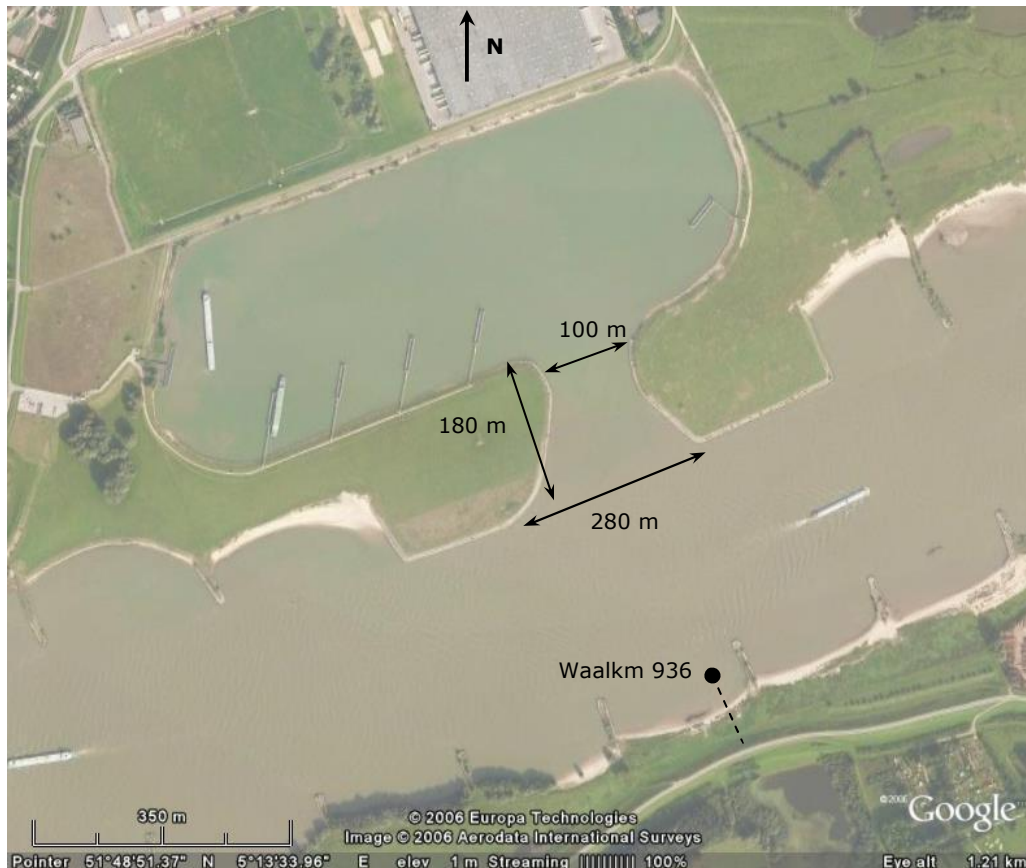


Figuur A-25 Overschrijding maandgemiddelde slibconcentratie in de Bergsche Maas bij Keizersveer

## A.2 Beschikbare gegevens overnachtingshaven Haaften

### Algemeen

De overnachtingshaven Haaften gelegen langs de rechteroever van de Waal nabij km 936 is aangesloten via een in breedte verlopende invaartopening, zie Figuur A-26. De haven beslaat een oppervlak van 26 ha. De invaartopening is aan de rivierzijde circa 260 m breed en aan de havenzijde circa 100 m. De haveningang is circa 180 m lang. In de haven bevinden zich vier aanlegsteigers aan de zuidwest zijde, één faciliteitensteiger aan de oostzijde en een steiger voor het overzetten van auto's aan de westzijde.



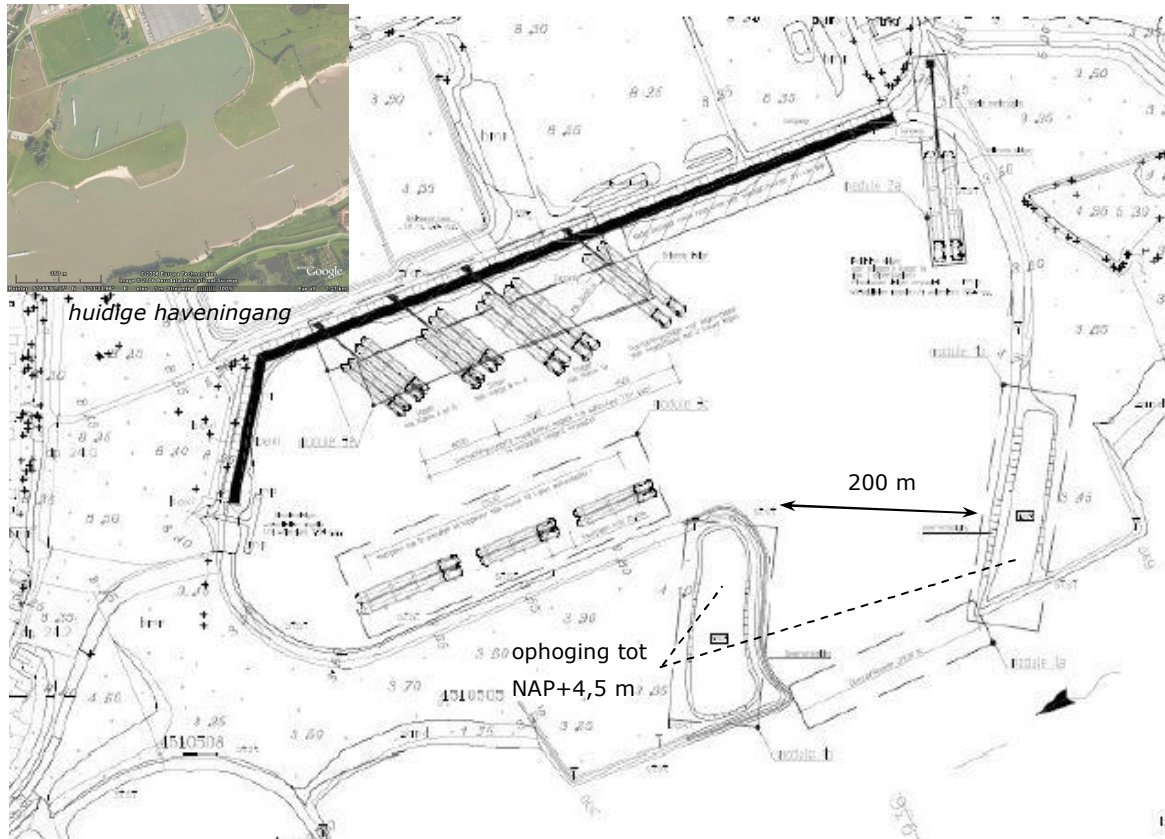
Figuur A-26 Overzicht overnachtingshaven Haaften aan de Waal, km 936

De haven is ontworpen voor CEMT scheepvaartklasse IV, schepen met een maximale lengte van 85 m, breedte van 9,5 m en diepgang van 2,5 m met een laadvermogen tot 1500 ton. In de haven kunnen maximaal 25 schepen afmeren. In de toekomstige situatie moet de haven geschikt zijn voor schepen van klasse Va met een maximale lengte van 110 m en breedte van 11,45 m en een diepgang tot 4,5 m met een laadvermogen tot 3000 ton.

De haven bij Haaften is de oudste uitwijkhaven langs de Waal en is in 1986 in gebruik genomen. Na het winnen van zand is de haven aangelegd. Onder andere door een aantal scheepsstrandingen tijdens hoogwater in de haveningang en de behoefte aan aanlegplaatsen voor meer en grotere schepen is het plan om de haven integraal aan te passen. Met name de dwarsstroom over de havenhoofden tijdens hoogwater bemoeilijkt het invaren van de haven. In combinatie met misleidende verlichting en de bij sommige schippers onbekende trechtersvormige haveningang heeft in de afgelopen jaren geleid tot 17 grondingen. Tijdens laagwatersituaties zijn geen gevallen van grondingen bekend.



Door Grontmij (2007) is een aantal varianten voor de inrichting voorgesteld in een projectnota. Daarin is één nieuwe vorm voor de haveningang aangegeven. De haveningang wordt in het voorstel verbreed tot 200 m en de landhoofden langs de ingang worden verhoogd tot NAP+4,5 m, zie Figuur A-27. De geschetste oplossing is een eerste aanzet tot aanpassing van de haveningang, maar de aanpassing zal van de haven niet op korte termijn (binnen bijvoorbeeld 5 jaar) worden gerealiseerd.



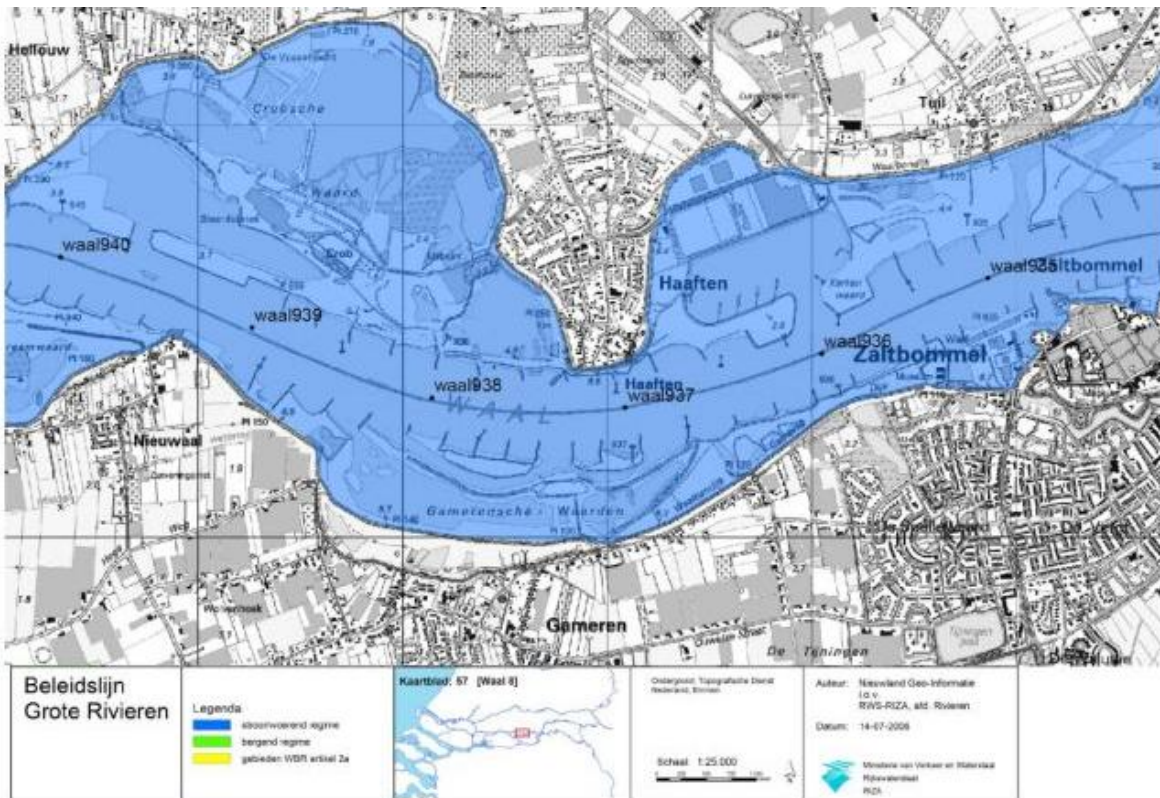
Figuur A-27 Een van de voorgestelde oplossingsrichtingen voor Haften, uit Grontmij (2007)

In de havenmond slaat sediment vanuit de rivier neer. De hoeveelheden zijn te bepalen uit opvolgende peilingen, die beschikbaar zijn evenals GIS-kaarten van de vaarweg in de Waal voor de haven. Er zijn geen problemen bekend van vastlopende schepen, hoe vaak er wordt gebaggerd in de havenmond is bekend.

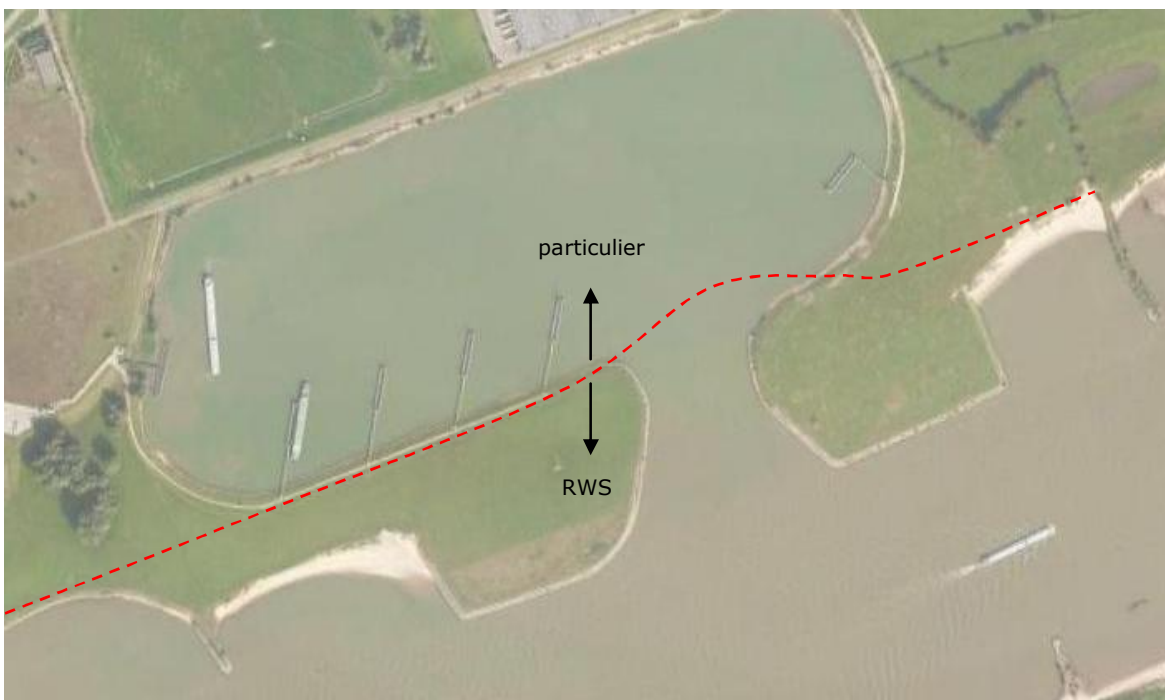
In 2006 is bodemonderzoek gedaan in de haven, het blijkt relatief schone grond te zijn. Een baggeraar mocht omniëter sediment winnen in de havenmond, maar is met winnen gestopt omdat de grond niet geschikt (i.e. schoon genoeg) werd bevonden voor de handel.

De haven en kades en fabriekshal die aan de haven grenst, liggen allemaal buitendijks en bovendien in het stroomvoerende regime volgens de Beleidslijn Grote Rivieren uit 2006 (BGR), zie Figuur A-28.

De haven is in eigendom van een particulier, de haveningang en een deel van het winterbed is eigendom van Rijkswaterstaat, zie Figuur A-29. Er loopt momenteel een procedure om de haven in eigendom van RWS te verkrijgen. Geschat wordt dat deze procedure circa 3 à 5 jaar in beslag zal nemen, tot die tijd zijn aanpassingen in de haven, met name van de ligplaatsen, niet mogelijk.



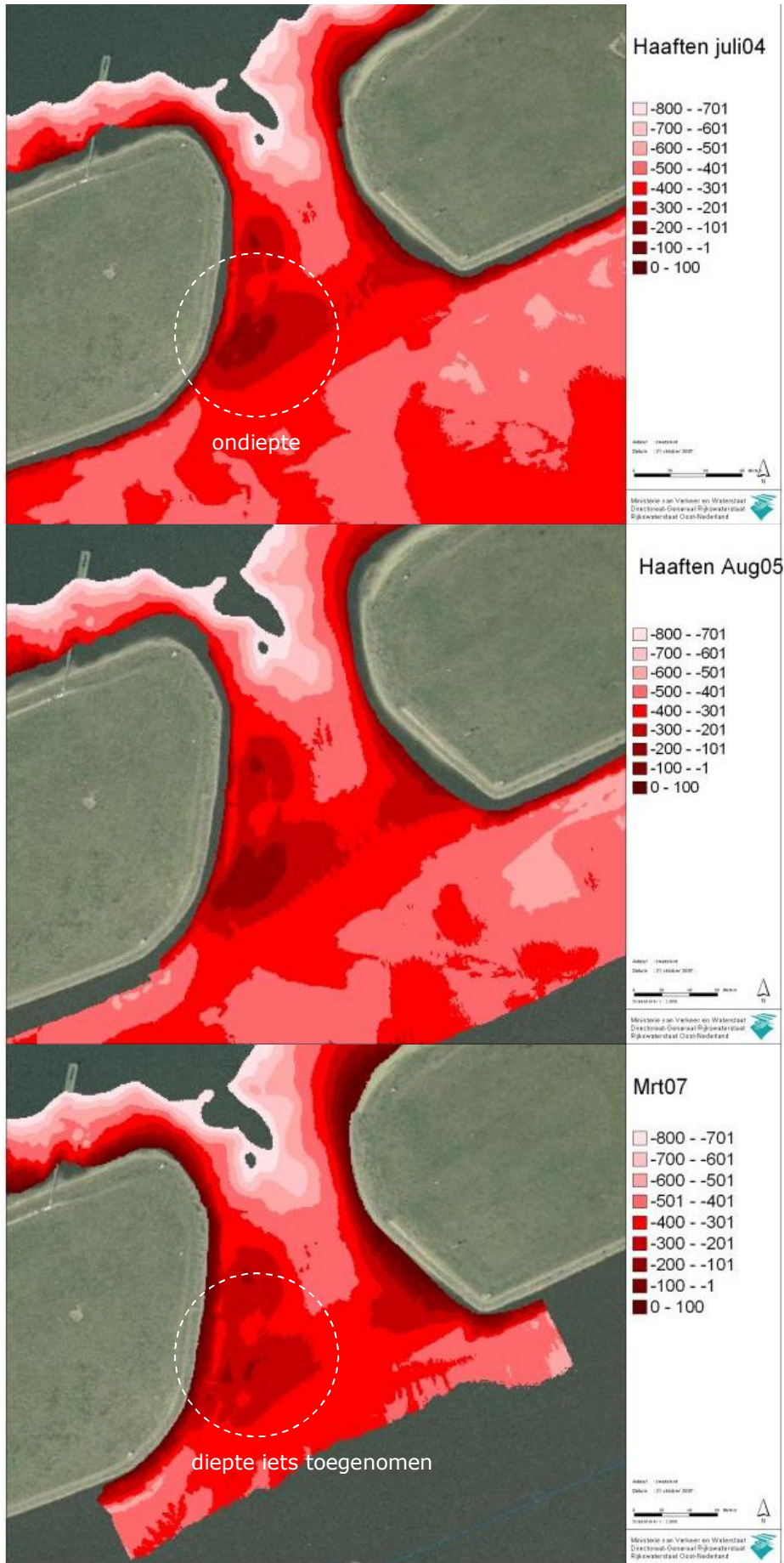
Figuur A-28 Stroomvoerend regime langs de Waal nabij Haften volgens de BGR 2006



Figuur A-29 Eigendomsgrens overnachtingshaven Haften langs de Waal

**Bodempelingen**

De bodem in de haveningang is gepeild in 2004, 2005 en 2007. In Figuur A-30 zijn de drie bodemliggingen aangegeven. De veranderingen in de periode van 2 à 3 jaar zijn gering, alleen is duidelijk dat het bodemniveau aan de zuidwest zijde van de ingang sneller veranderd dan op de overige locaties. De ondiepte in 2004 lijkt minder te zijn in 2007, mogelijk als een gevolg van baggeren.

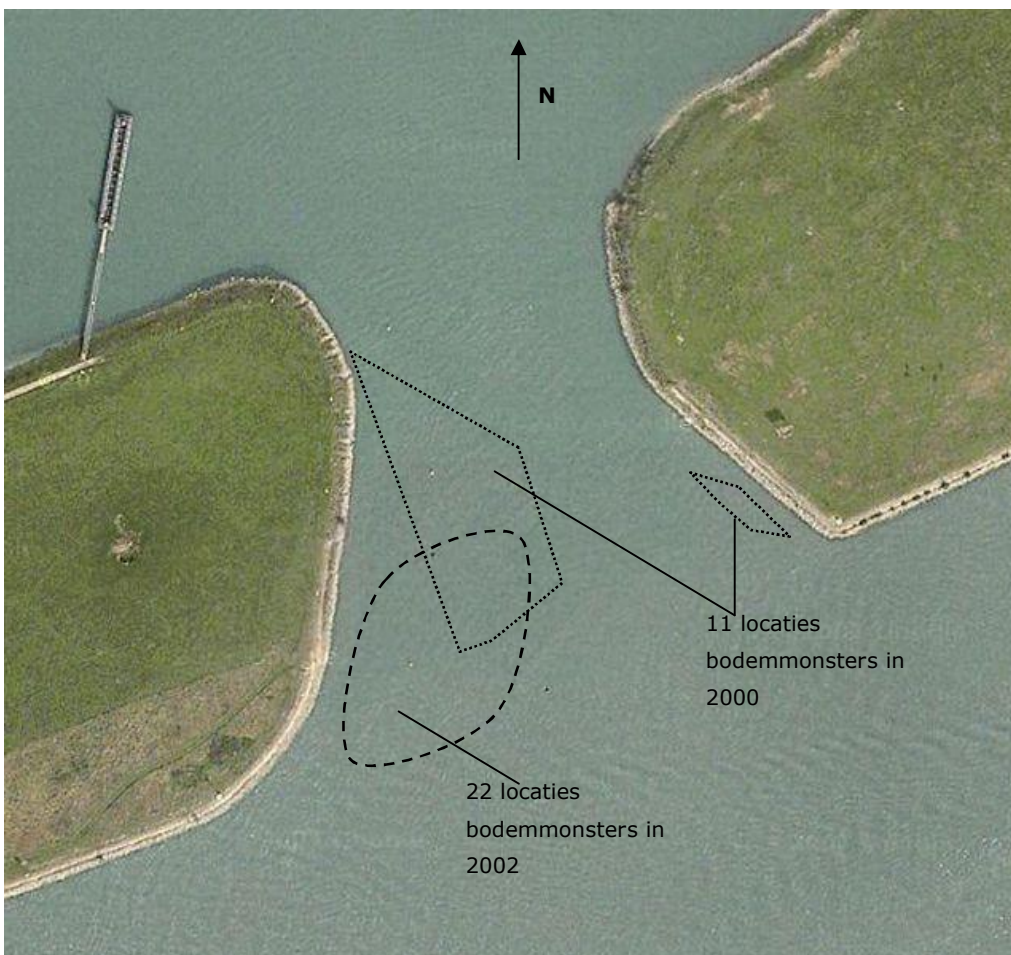


Figuur A-30 Bodempeiling in monding overnachtingshaven Haafden, jul 2004, aug 2005, mrt 2007

## Bodemsamenstelling

De bodemsamenstelling in de invaartopening van de overnachtingshaven Haaften is onderzocht in oktober 2000 en april en oktober 2002. De bevindingen zijn:

- Uit het bodemonderzoek uitgevoerd in oktober 2000 (CSO, 2000) volgt dat er langs de oostelijke zijde van de invaartopening ongeveer 2000 m<sup>3</sup> moet worden gebaggerd om de bodem op een gewenst niveau van NAP-2,15 m te krijgen. Er zijn 11 bodemmonsters genomen, zie Figuur A-31, waarvan de bovenste 0,4 m voornamelijk bestaat uit grof zand en grind en waarin zich tussen de 2% en circa 20% (op drie locaties) slib bevindt. De kwaliteit van het slib is klasse 0 en 1.
- Uit onderzoek van afgezet slib op het wegenstelsel rond de haven (Verhoeven, 2002) in maart 2002, volgt dat na een hoogwaterperiode een sliblaag van de 2 à 3 cm is afgezet. Het slib komt vermoedelijk uit de haven en de kwaliteit van het slib is klasse 2.
- Uit het bodemonderzoek uitgevoerd in oktober 2002 (VH, 2002) volgt dat er langs de oostelijke zijde van de invaartopening ongeveer 2000 m<sup>3</sup> moet worden gebaggerd om de bodem op een gewenst niveau te krijgen. Er zijn 22 bodemmonsters genomen, zie Figuur A-31, waarvan de bovenste 1,5 m à 2 m voornamelijk bestaat uit grof zand en grind en waarin zich ongeveer 2% slib bevindt. De kwaliteit van het slib is klasse 2 op deze locatie waar relatief veel materiaal neerslaat zoals blijkt uit ervaring van de meetdienst.



Figuur A-31 Locaties bodemmonsternamen in 2000 en 2002 invaart overnachtingshaven Haaften

## Bijlage B: Monitoringplan Amerhaven

### B.1 Algemeen

Na hoge afvoeren op de Maas worden vaak verondiepingen geconstateerd in het gebied ter hoogte van de inloop van de Donge en de haven van de Amercentrale. Om die reden is daar in het verleden regelmatig baggerwerk uitgevoerd. De Meetdienst is betrokken geweest bij het in kaart brengen van de verondiepingen en de situatie na een baggerwerk. Het vastleggen van de bodemligging en stromingspatronen draagt bij aan het inzicht in het sedimentatiegedrag. Uit metingen rond een hoogwaterperiode is gebleken dat dan de grootste sedimentatie plaats vindt en dat er onder normale omstandigheden nauwelijks sedimentatie optreedt. Daarom wordt voorgesteld het onderzoek te richten op de situatie tijdens hoge afvoeren van de Maas.

Het volgende monitoringplan is voorgesteld:

1.  $T_0$ -situatie vastleggen (nulmeting). Dit kan gecombineerd worden met de metingen die ter verificatie uitgevoerd kunnen worden na het baggerwerk.
2.  $T_{AFV}$ -situatie vastleggen. Na hoge afvoeren, waarbij de sedimentatie en erosieprocessen een forse impuls krijgen, dient er gemeten te worden.
3.  $T_{JR}$ -situatie vastleggen. Ieder jaar wordt de Bergsche Maas en de Amer gelood. Er zullen extra meetinspanningen verricht worden, zodat de bodemligging in het hieronder weergegeven gebied gedetailleerd in kaart gebracht wordt.
4. Op nog nader te specificeren momenten worden ADCP-metingen uitgevoerd, ten einde de stroming in en rond de havenmond in kaart te brengen.

Het gebied waarin wordt gemeten loopt van het eind van de nevengeul net voor de Dombosch tot aan de ingang van het kanaal naar de Amer, de Donge tot aan de scheepswerf en een deel van de Amerhaven. Stroomsnelheidsmetingen kunnen worden uitgevoerd tijdens normale en meer extreme afvoersituaties. Voorgesteld wordt enkele dwarsraaien vanuit de rivier tot in de Amerhaven.

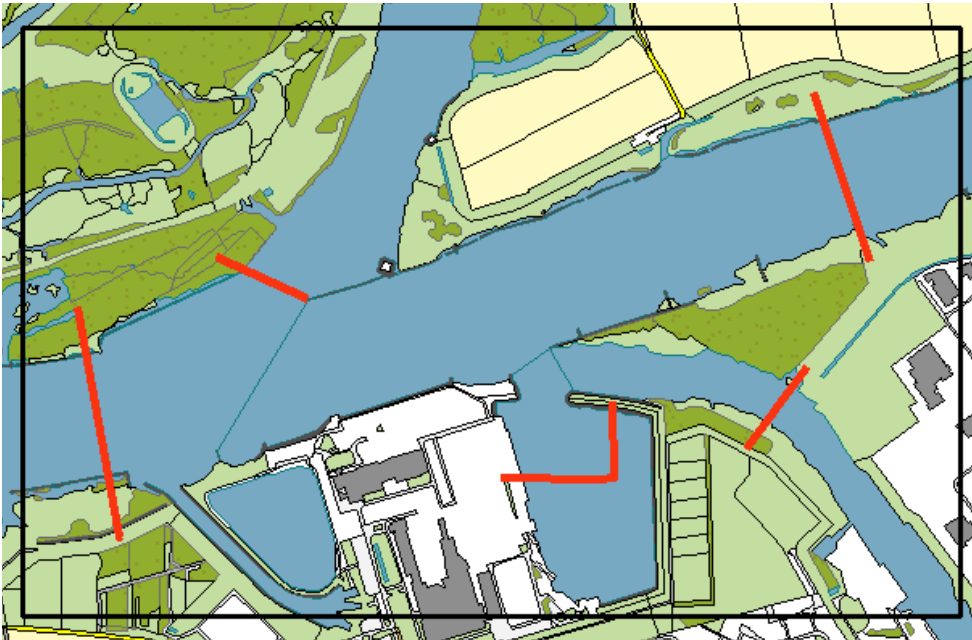
### B.2 Peilen bodemligging in het onderzoeksgebied

Het voorgestelde onderzoeksgebied is aangegeven in Figuur B-1. Om inzicht te krijgen in de ontwikkeling van de bodemligging wordt de bodem in het onderzoeksgebied in kaart gebracht tot een diepte van ca NAP-1 m. Hiertoe zal middels lodingen het gebied zodanig worden ingemeten dat een gebiedsdekkend grid van 1 m x 1 m geleverd kan worden.

Vanuit de beheerstaken van Rijkswaterstaat Zuid-Holland wordt de bodem van de Amer en Bergsche Maas éénmaal per jaar gemeten (in de vaargeul tot een diepte van ca NAP -4 m bij de oevers). Het gebied vanaf NAP-4 m tot de oevers wordt eens per twee jaar vastgelegd. In 2007 is in gebied baggerwerk verricht, de loding van 2007 is uitgevoerd op het moment dat het baggerwerk bij de inloop van de haven grotendeels gereed was. In december 2007 is er een matig hoge afvoer geweest waardoor er waarschijnlijk al sedimentatie is opgetreden in de havenmond. Als aanvulling op bovenstaande informatie wordt het volgende voorgesteld:

- De loding van 2007 te beschouwen als uitgangssituatie vóór de hoger afvoer.
- Op korte termijn het gehele gebied opnieuw inmeten.

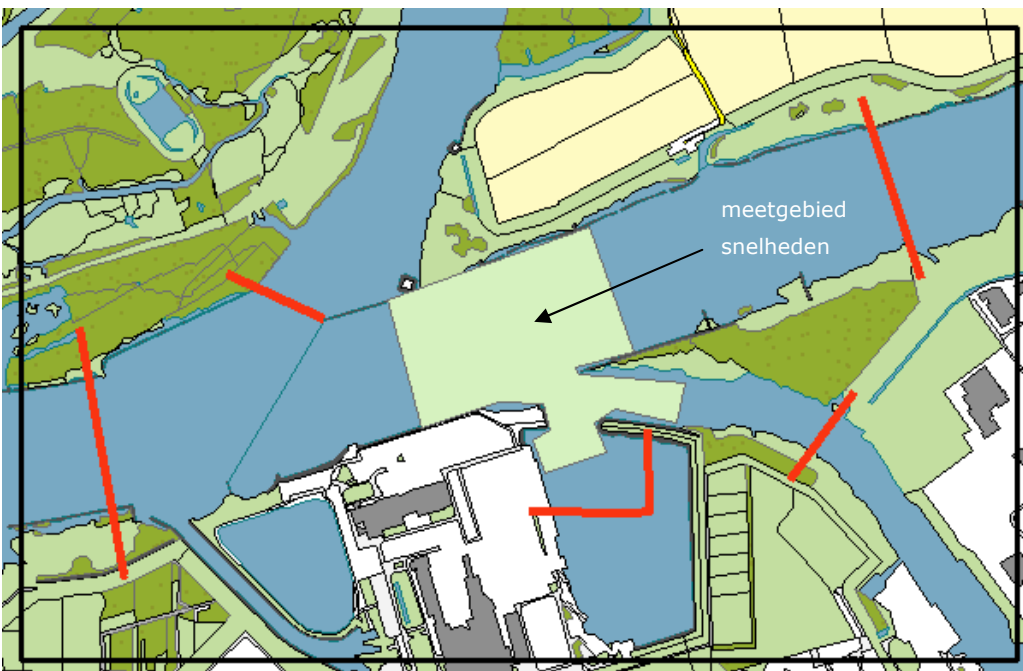
Hieruit is het effect van de hoge afvoer (december 2007) af te leiden en kan de huidige situatie als  $T_0$  voor vervolgmetingen worden beschouwd. Na een volgende hoge afvoer het gebied opnieuw inmeten.



Figuur B-1 Definitie meetgebied voor het monitoren van de bodem in de Bergsche Maas en Amerhaven

**B.3 Stromingsmetingen in het onderzoeksgebied**

Voor zo ver bekend is er geen stromingsinformatie in het onderzoeksgebied voorhanden. Om inzicht te krijgen in het stromingsbeeld wordt voorgesteld snelheidsmetingen uit te voeren in het gebied aangegeven in Figuur B-2. In het gebied worden de stroomsnelheid en -richting gemeten. De metingen dienen zodanig te zijn dat de snelheid en richting is af te leiden in zowel het horizontale- als verticale vlak. Een methode is om met een ADCP-meter te meten waarbij door in het gebied langs een aantal meetraaien tracks wordt gevaren waarbij continu wordt gemeten.



Figuur B-2 Definitie meetgebied voor het meten van stroomsnelheden in de Bergsche Maas en Amerhaven

De opzet van de meetraaien wordt bepaald door de informatie die gewenst wordt. Wanneer vaste (rechtlijnige) tracks worden gemeten is de Meetdienst in staat om deze te presenteren in snelheidsprofielen. Wanneer gekozen wordt voor een meer ruimtelijk inzicht, zal een gebiedsdekkend vaarpatroon nodig zijn. De aldus verkregen informatie kan als input dienen voor een 3-D beeld of een rekenmodel. De verwerkingsprogrammatuur is echter niet direct beschikbaar bij de Meetdienst (Zuid-Holland). Voorgesteld wordt om voor het meten en verwerken van de stromingsinformatie nadere afspraken te maken met de meetdienst en andere betrokkenen.

#### **B.4 Meetperiode en tijdbesteding**

Sedimentatie treed vooral op bij hoge afvoeren van de Maas. In die situatie is de rivier ongestuwd en treden stroomsnelheden op waarbij veel sediment wordt afgevoerd. In deze periode kan het stromingsbeeld worden vastgelegd. Om inzicht te krijgen in de mate van sedimentatie bij een hoge afvoer kan de bodemligging vóór en na een hoge afvoer worden vastgelegd.

De duur van extra meettijd ten opzichte van de reguliere metingen wordt geschat op 3 dagen per keer.





## Bijlage C: Monitoringplan haven Haaften

### C.1 Algemeen

Na hoge afvoeren van de Rijn worden vaak verondiepingen geconstateerd in het gebied ter hoogte van de invaart van de overnachtingshaven Haaften. Om die reden is daar in het verleden regelmatig baggerwerk uitgevoerd. De Meetdienst is betrokken geweest bij het in kaart brengen van de verondiepingen en de situatie na een baggerwerk. Het vastleggen van de bodemligging en stromingspatronen draagt bij aan het inzicht in het sedimentatiegedrag. De grootste sedimentatie vindt plaats tijdens hoogwatersituaties als de landhoofden overstromen, onder normale omstandigheden treedt er nauwelijks sedimentatie op. Daarom wordt voorgesteld het onderzoek te richten op de situatie bij hoge afvoeren van de Rijn.

Het volgende monitoringplan is voorgesteld:

1. T<sub>0</sub>-situatie vastleggen (nulmeting). Dit kan gecombineerd worden met de metingen die ter verificatie uitgevoerd kunnen worden na het baggerwerk.
2. T<sub>AFV</sub>-situatie vastleggen. Na hoge afvoeren, waarbij de sedimentatie en erosieprocessen een forse impuls krijgen, dient er gemeten te worden.
3. T<sub>JR</sub>-situatie vastleggen. Ieder jaar wordt de Bergsche Maas en de Amer gelood. Er zullen extra meetinspanningen verricht worden, zodat de bodemligging in het hieronder weergegeven gebied gedetailleerd in kaart gebracht wordt.
4. Op nog nader te specificeren momenten worden ADCP-metingen uitgevoerd, ten einde de stroming in en rond de havenmond in kaart te brengen.

Het gebied waarin wordt gemeten loopt van 500 m oostelijke van de haveningang tot 500 m westelijk ervan. Stroomsnelheidsmetingen kunnen worden uitgevoerd tijdens normale en meer extreme afvoersituaties. Voorgesteld wordt enkele dwarsraaien vanuit de rivier tot in de haven.

### C.2 Peilen bodemligging in het onderzoeksgebied

Het voorgestelde onderzoeksgebied is aangegeven in Figuur C-1. Om inzicht te krijgen in de ontwikkeling van de bodemligging wordt de bodem in het onderzoeksgebied in kaart gebracht tot een diepte van ca NAP-1 m. Hiertoe zal middels lodingen het gebied zodanig worden ingemeten dat een gebiedsdekkend grid van 1 m x 1 m geleverd kan worden.

Vanuit de beheerstaken van Rijkswaterstaat Oost-Nederland wordt de bodem van de Amer en Bergsche Maas éénmaal per jaar gemeten (in de vaargeul tot een diepte van ca NAP-4 m bij de oevers). Het gebied vanaf NAP-4 m tot de oevers wordt eens per twee jaar vastgelegd. In december 2007 is er een matig hoge afvoer geweest waardoor er waarschijnlijk al sedimentatie is opgetreden in de havenmond. Als aanvulling op bovenstaande informatie wordt het volgende voorgesteld:

- De loding van 2007 te beschouwen als uitgangssituatie vóór de hoger afvoer.
- Op korte termijn het gehele gebied opnieuw inmeten.

Hieruit is het effect van de hoge afvoer (december 2007) af te leiden en kan de huidige situatie als T<sub>0</sub> voor vervolgmetingen worden beschouwd. Na een volgende hoge afvoer het gebied opnieuw inmeten.

Bodemmonsters kunnen in de haveningang worden genomen, zie Figuur C-1, over een laagdikte van 0,5 m. Van de monsters wordt de zeefkromme bepaald.



Figuur C-1 Definitie meetgebied voor het monitoren van de bodem in de Bergsche Maas en Amerhaven

### C.3 Stromingsmetingen in het onderzoeksgebied

Voor zo ver bekend is er geen stromingsinformatie in het onderzoeksgebied voorhanden. Om inzicht te krijgen in het stromingsbeeld wordt voorgesteld snelheidsmetingen uit te voeren in het gebied aangegeven in Figuur C-2. In het gebied worden de stroomsnelheid en –richting gemeten. De metingen dienen zodanig te zijn dat de snelheid en richting is af te leiden in zowel het horizontale- als verticale vlak. Een methode is om met een ADCP-meter te meten waarbij door in het gebied langs een aantal meetraaien vijf tracks wordt gevaren waarbij continu wordt gemeten.



Figuur C-2 Definitie meetgebied voor het meten van stroomsnelheden in de Bergsche Maas en Amerhaven

De opzet van de meetraaien wordt bepaald door de informatie die gewenst wordt. Wanneer vaste (rechtlijnige) tracks worden gemeten is de Meetdienst in staat om deze te presenteren in snelheidsprofielen. Wanneer gekozen wordt voor een meer ruimtelijk inzicht, zal een gebiedsdekkend vaarpatroon nodig zijn. De aldus verkregen informatie kan als input dienen voor een 3-D beeld of een rekenmodel. De verwerkingsprogrammatuur is echter niet direct beschikbaar bij de Meetdienst (Oost-Nederland). Voorgesteld wordt om voor het meten en verwerken van de stromingsinformatie nadere afspraken te maken met de meetdienst en andere betrokkenen.

#### **C.4 Meetperiode en tijdbesteding**

Sedimentatie treed vooral op bij hoge afvoeren van de Rijn. In die situatie treden stroomsnelheden op waarbij veel sediment wordt afgevoerd. In deze periode kan het stromingsbeeld worden vastgelegd. Om inzicht te krijgen in de mate van sedimentatie bij een hoge afvoer kan de bodemligging vóór en na een hoge afvoer worden vastgelegd.

De duur van extra meettijd ten opzichte van de reguliere metingen wordt geschat op 3 dagen per keer.



## Bijlage D: Monitoringplan haven Roermond

### D.1 Inleiding

Het doel van het monitoringplan voor de haven van Roermond is het vastleggen van de huidige toestand van de haven en toekomstige ontwikkelingen ten gevolge van maatregelen te volgen. Dit plan geeft weer wat, hoe, waar, en wanneer moet worden gemeten. Deze metingen bestaan uit metingen van de bodemligging en bodemsamenstelling, en metingen van de waterbeweging en sedimentconcentratie. De metingen zullen in het reguliere meetprogramma van de Meetdienst moeten worden ingepast. Dit monitoringplan is opgesteld door Deltares (voorheen WL|Delft Hydraulics).

### D.2 Beschrijving havens

De haven van Roermond bestaat uit de havens 't Steel (meest zuidelijke haven, zie Figuur D-1, en La Bonne Aventura. La Bonne Aventura is 700 m lang en tot 100 m breed; 't Steel is 150 m lang en 40 m breed. Beide zijn via een gemeenschappelijke 40 m brede ingang met de Maas verbonden. De ingang ligt 700 m benedenstrooms van een bocht in de Maas, welke ter plaatse ruim 100 m breed is. Benedenstrooms van de haveningang ligt een strekdam, en bovenstrooms van de ingang een ligweide, welke beide bij hoog water overstromen.



Figuur D-1 Overzichtsbeeld van jachthavens 't Steel en La Bonne Aventura, de Maas nabij Roermond

De Maas stroomt van Zuid naar Noord, en drijft een aantal neren in de haven aan. De waterbeweging in de haven van Roermond is gemodelleerd met een fysisch schaalmodel door van Schijndel en Kranenburg (1997). Aan de bovenstroomse zijde van de havenmond laat de stroming los en wordt een menglaag gevormd. Hierdoor wordt een met de wijzers van de klok meedraaiende neer gevormd in de ingang van de haven, zie Figuur D-2. De snelheid in deze neer is tot 23% van de snelheid op de Maas. De primaire neer drijft op zijn beurt weer een tegen de wijzers van de klok meedraaiende secundaire neer aan in de haven van La Bonne

Aventure, welke een snelheid heeft tot 8% van de snelheid heeft op de rivier. Om inzicht te krijgen in het effect van eventuele maatregelen op aanslibbing in de haven, dienen deze circulatie cellen voor verschillende condities ingemeten te worden. Daarnaast dient bepaald te worden onder welke afvoercondities de strekdam overstroomt en geschat wat het debiet er overheen is.



Figuur D-2 Geschematiseerde circulatiecellen in de haven van Roermond (op basis van Van Schijndel en Kranenburg, 1997)

### D.3 Bodemligging en waterstand

Om inzicht te krijgen in de huidige aanslibbing in de haven en eventuele effecten van constructies nabij de ingang van de haven op sedimentatie in de haven en erosie/sedimentatie in de haven, dient de bodemligging een aantal malen opgenomen te worden. De grootste morfologische veranderingen treden op tijdens en na hoog water (afvoer Borgharen vanaf 1250 m<sup>3</sup>/s) en daarom dient bij voorkeur (direct) voor en direct na een hoge afvoer lodingen uitgevoerd te worden. Om aanslibbing tijdens laag water vast te stellen moet de bodem gepeild worden aan het begin en aan het eind van de zomerperiode, het laagwaterseizoen.

Het te loden gebied beslaat uit praktisch oogpunt alleen het deel van de haven zonder schepen en steigers, zie Figuur D-3. Hierdoor wordt geen sluitend sediment budget gekregen, maar wel een indicatie van de verandering van aanslibbing door de tijd. Ook mag aangenomen worden dat het meeste slib in dit deel van de haven bezinkt omdat de stroomsnelheden in de haven laag zijn.

Aangezien het mogelijk is dat waterbouwkundige werken om sedimentatie in de haven leiden tot morfologische veranderingen op de Maas zelf, dient deze gelijktijdig gelood te worden.

Hiervoor lijkt 300 meter in stroomopwaartse richting en 500 m in stroomafwaartse richting voldoende, zie Figuur D-3. De raaien liggen op een onderlinge afstand van 10 m, indien single-beam echosounding wordt gebruikt. Bij multi-beam echosounding kan een grotere raaiafstand aangehouden worden.

Tijdens hoge afvoeren kunnen de ligweide (ten zuiden van de haveningang) en de strekdam (ten noorden van de haveningang) overstromen. Om vast te stellen onder welke afvoercondities dit gebeurt, dient,

- de hoogte van beiden ingemeten te worden en
- de lokale de waterstand gemonitord te worden.

De waterstand kan gemeten worden met een drukmeter, bij voorkeur geplaatst in Maas nabij de haveningang. Praktisch gezien is het echter veel eenvoudiger om de druksensor in de haven te plaatsen, in combinatie met de OBS sensor (geel kruis in Figuur D-3).



Figuur D-3 Monitoringsgebied rond de haven van Roermond

#### D.4 Stroomsnelheid

Om de sedimentatie te koppelen aan de waterbeweging en sedimenttransport op de Maas en in de circulatie cellen, dienen ADCP metingen uitgevoerd te worden tijdens hoge afvoer condities (Borgharen vanaf  $1250 \text{ m}^3/\text{s}$ ) en lage afvoer condities (Borgharen  $250 - 500 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Hiervoor dienen twee parallelle raaien vanaf de Maas de haven in gevaren te worden. De onderlinge afstand is 25 m, dwars op de hoofdstroom van de Maas. Deze raaien dienen zo ver mogelijk de haven in gevaren te worden om het stroombeeld van de circulatie cellen (deels) vast te leggen.

Aanvullend moet een raai over de ingang van de haven (dwars op de eerder raaien) gevaren worden, evenals een parallelle raai verder in de haven. Daarnaast dienen twee raaien in de Maas, dwars op de stroming, gevaren te worden, zie Figuur D-3.

#### **D.5 Sedimentconcentratie**

Gelet op de wens om het slibbeeld zo duidelijk mogelijk te kennen is het meten van de sedimentconcentratie over de verticaal wenselijk. Hiervoor is de inzet van een SiltProfiler geschikt. Dit dient te gebeuren op twee locaties in de haven, nabij de ingang van de haven en halverwege de haven, zie Figuur D-3, en op de Maas zelf. Bij voorkeur dienen deze metingen gecombineerd te worden met de ADCP metingen zodat de echo intensiteit (backscatter) van de ADCP omgerekend kan worden tot een sedimentconcentratie. Voor de omzetting van backscatter intensiteit naar sedimentconcentratie is een goede calibratieprocedure gewenst, waarvoor het meten van de sedimentconcentratie over de verticaal nodig is.

Om de representativiteit van deze metingen in te schatten dient bij voorkeur ook een tijdserie van sedimentconcentraties gemeten te worden in de ingang van de haven, zie locaties in Figuur D-3, door een OBS halverwege de waterkolom te plaatsen. Om de sediment-influx over de strekdam te kwantificeren moet tijdens hoogwater een OBS sensor geplaatst worden op de strekdam, zie locatie in Figuur D-3. Sediment-influx via de ligweide (ten zuiden van de haveningang) wordt gemeten met de OBS geplaatst in de haveningang.

Ter aanvulling van de OBS-meting kan overwogen worden om één of twee (akoestische) snelheidsmeters te plaatsen op de strekdam, zodat een beeld kan verkregen worden van de stroming over de dam (en niet alleen een sedimentconcentratie).

#### **D.6 Korrelgrootte**

De korrelverdeling van het bodemmateriaal dient bij voorkeur aan het einde van het winterseizoen en het zomerseizoen bepaald te worden uit bodemmonsters (dus tweemaal in een jaar), in combinatie met de echolodingen. De monsters dienen genomen te worden in een 25 m bij 25 m rooster op de locatie van de ADCP-raaien. In de haven is een hogere resolutie (15 m bij 15 m) wenselijk in de haveningang. De bodem in het overig deel van de haven, dat ook met echolodingen ingemeten wordt, kan met een resolutie van 25 bij 25 m worden bemonsterd.

#### **D.7 Prioriteiten**

Het hierboven beschreven monitoringprogramma is uitgebreid en daardoor prijzig. Er kan daarom onderscheid worden gemaakt tussen essentiële onderdelen van het programma en optionele aanvullingen hierop.

De meest essentiële onderdelen zijn:

1. de echolodingen om de aanslibbing te kwantificeren,
2. de ADCP stroomsnelheidsmetingen en sedimentconcentratie metingen in de waterkolom.

Optionele aanvullingen hierbij zijn:

1. het bepalen van overstroming van de strekdam en ligweide door middel van drukmetingen en hoogtebepalingen,
2. het meten van tijdseries van de sedimentconcentratie op de strekdam en in de haveningang,
3. het omzetten van echo-intensiteit van de ADCP naar een sedimentconcentratie.



## D.8 Prijsindicatie

De prijs voor de vaste meetopstelling is afhankelijk van de duur en het aantal sensoren; een deel van de prijs zijn vaste kosten en een deel zijn maandelijkse kosten. In het rekenvoorbeeld in Tabel D-1 is uitgegaan van 3 maanden inzet, 2 OBS'en en 2 druksensoren.

onderdeel	OBS	druksensor
huur (€/maand)	600	110
onderhoud (€/maand)	1.400	350
aantal sensoren	2	2
aantal maanden	3	3
plaatsing sensoren en calibratie	5.300	
<i>totaal lange termijn monitoring</i>	<i>€ 20.060</i>	

Tabel D-1 *Kostenschatting (excl. BTW) vaste meetopstelling voor twee OBS-en en twee druksensoren, op dezelfde locatie en hetzelfde tijdstip geplaatst (exclusief rapportage)*

Bij de metingen vanaf meetschepen is ervan uitgegaan dat de meetschepen, uitgerust met plaatsbepaling, davit, winch, en ADCP door de opdrachtgever (RWS) beschikbaar worden gesteld en bediend worden. Ook wordt er vanuit gegaan dat uitwerking van de ADCP door RWS wordt gedaan. In dat geval komt het nemen van bodemmonsters en vervolgens de analyse van de korrelsamenstelling (Malvern) op € 4.000,-. Het doen van alleen SiltProfiler metingen voor de waterkolom komt op € 5.000,- en het omzetten van ADCP backscatter naar sedimentconcentratie op € 11.000,-. Bij voorkeur zouden deze metingen gedaan worden bij hoge en bij lage afvoer en dus in tweevoud. Een meetrapport, waarin de meetresultaten uit de scheepscampagnes en de kort en bondig worden beschreven, kost € 4.000,-. Een uitgebreider rapport, waarin de metingen wat uitvoeriger worden geanalyseerd en aanslibbing wordt gekwantificeerd wordt in eerste instantie geschat op € 15.000,-. Dit is echter afhankelijk van de precieze wensen voor de rapportage.

Activiteit	Prijs in €
SiltProfiler sediment concentratie	5.000 × 2
Omzetting backscatter naar sediment concentratie, inclusief beknopte rapportage	11.000 × 2
Bodemmonsternamen + analyse	4.000
Meetrapportage	4.000
Gedetailleerde rapportage	15.000
<i>Totaal</i>	<i>55.000</i>

Tabel D-2 *Kosten (excl. BTW) SiltProfiler en ADCP echo intensiteit (uitgaande van gebruik ADCP RWS)*

De prijzen zoals hier gegeven zijn een eerste schatting en zijn afhankelijk van de uiteindelijke wensen van de opdrachtgever. Een aantal onderdelen kan worden geschrapt, maar mogelijk heeft dit weer verdere consequenties (verhoging) voor de overige prijsstellingen. Een definitieve offerte voor het monitoringplan kan pas worden opgesteld als er meer duidelijkheid is over de wensen met betrekking tot de metingen.

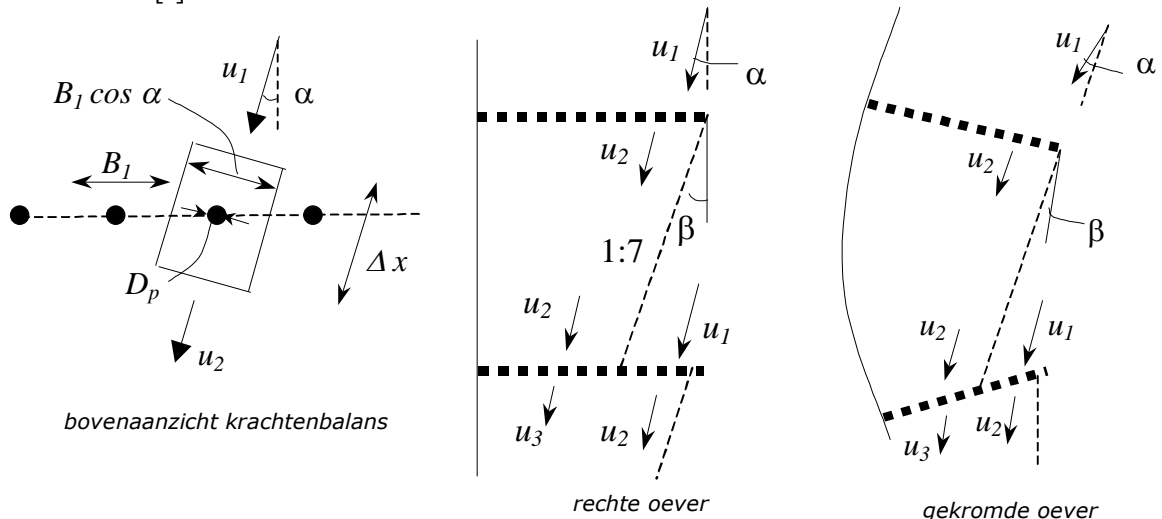


## Bijlage E: Ontwerp doorlatende kribben

Doorlatende kribben kunnen volgens een idee van Maarten van der Wal (Deltares) worden ontworpen. Het uitgangspunt is dat een doorlatende lijnvormige constructie is opgebouwd uit dichte elementen waartussen een ruimte is gelaten. De stroomsnelheid bovenstrooms van de constructie wordt gereduceerd. De afstand tussen twee doorlatende kribben wordt bepaald door de afstand waarover de gereduceerde stroomsnelheid weer herstelt tot de oorspronkelijke snelheid. De reductie van de stroomsnelheid kan worden bepaald met een beschouwing van de stromingskrachten balans,

$$F \cdot \Delta t = m_1 \cdot u_1 - m_2 \cdot u_2 \tag{E-1}$$

met  $F$  = kracht op de paal [N],  $m$  = watermassa [kg],  $u_1$  = gemiddelde stroomsnelheid bovenstrooms van krib [m/s],  $u_2$  = gemiddelde stroomsnelheid benedenstrooms van krib [m/s],  $t$  = tijd [s]. In Figuur E-1 zijn de afmetingen gedefinieerd, daarin zijn,  $B_l$  = de 'paaldiameter' plus de opening tussen de 'palen' [m],  $D_p$  = de 'paaldiameter' [m],  $\alpha$  = de hoek tussen de aanstroming en de as van de krib [°],  $\beta$  = de dissipatiehoek, de 'verwijding' van de stroming in het kribvak [°].



Figuur E-1 Definities stromingsrichtingen en afmetingen doorlatende krib

Een krachtenbeschouwing volgens vergelijking (E-1) over het element met breedte  $B_l \cdot \cos \alpha$ , lengte  $\Delta x$ , waterdiepte  $h$  en de weerstandscoëfficiënt van de paal  $C_D$  is,

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot D_p h \cdot u_1^2 \cdot \Delta t = (\rho \cdot B_l h \cdot u_1 - \rho \cdot B_l h \cdot u_2) \cdot \Delta x \tag{E-2}$$

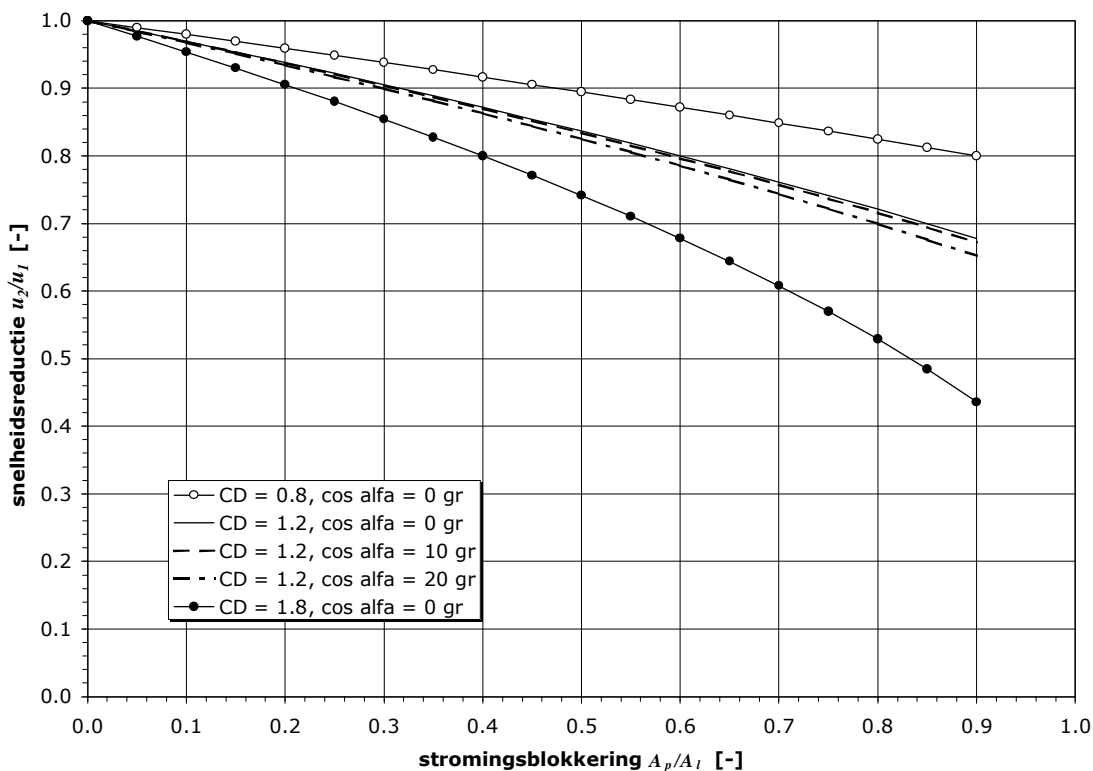
Uitwerken met de aanname dat  $\Delta x / \Delta t$  de lokale stroomsnelheid vertegenwoordigt, dus  $u_1$  of  $u_2$  resteert in de uitdrukking,

$$\frac{u_2}{u_1} = \sqrt{1 - \frac{1}{2} C_D \frac{A_p}{A_l \cdot \cos \alpha}} \tag{E-3}$$

waarin  $A_p$  = het aanstroomoppervlak van het dichte gedeelte van de krib [m<sup>2</sup>] en  $A_l$  = het doorstroomoppervlak van het open gedeelte van de krib [m<sup>2</sup>]. In principe kan de krib ook verticaal gedeeltelijk ondoorlatend zijn, dus is het praktischer om de grootheden  $D_p h$  en  $B_l h$  als oppervlakken  $A_p = D_p h_p$  en  $A_l = B_l h_l$  in vergelijking (E-3) te gebruiken.

De stroming in het kribvak zal verwijden, oftewel de gereduceerde stroomsnelheid achter de krib zal verder benedenstrooms weer gaan toenemen tot de 'ongestoorde' stroomsnelheid in de rivier. De verwijdingshoek  $\beta$  is in experimenten onderzocht en ligt tussen de  $6^\circ$  en  $10^\circ$ , maar in bijzondere gevallen kan de hoek oplopen tot  $14^\circ$ . Voor de ontwerpmethode is een gewogen gemiddelde voor  $\beta$  aangehouden van  $8^\circ$ , waardoor de verwijding langs een lijn 1:7 verloopt, zie Figuur E-1. De stroomsnelheid langs de oever in de kribvakken neemt stapsgewijs af met bijvoorbeeld een factor  $u_1/u_2 = 0,9$ , zie Figuur E-1. In het eerste kribvak is de snelheidsreductie 0,9 in het volgende kribvak  $u_2/u_3 = (0,9)^2 = 0,81$ , vervolgens 0,72, dan 0,63 en daarna 0,54. Na vijf kribvakken is de stroomsnelheid langs de oever ongeveer gehalveerd.

De grootte van de snelheidsreductie benedenstrooms van een doorlatende krib hangt af van de stromingshoek  $\alpha$ , de mate van stromingsblokkering ( $A_p/A_l$ ), de weerstandscoefficiënt  $C_D$ . In Figuur E-2 is voor enkele waarden van de genoemde grootheden de snelheidsreductie weergegeven. De gevoeligheid van de snelheidsreductie voor de weerstandscoefficiënt (0,8 tot 1,8) is groter dan voor de stromingshoek ( $0^\circ$  tot  $20^\circ$ ).

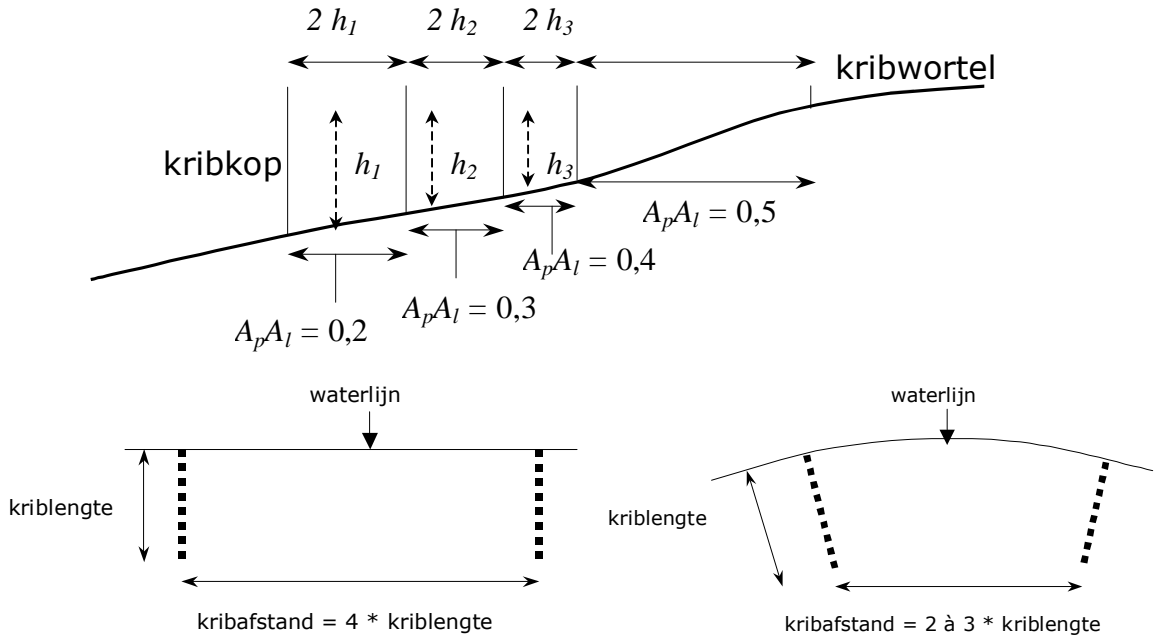


Figuur E-2 Gevoeligheid snelheidsreductie voor grootte stromingsblokkering en stromingshoek

Aanbevolen wordt om de doorlatendheid van een dergelijke constructie te laten variëren in langsricting. Nabij het landhoofd is de doorlatendheid lager dan aan het eind van de krib in de rivier. Daarmee nemen de snelheidsverschillen vanuit de rivier gezien langzaam toe in de richting van de oever. Deze gelijkmatiger overgang beperkt onder andere het ontstaan van diepe erosiekuiten rond de kribkoppen. Het aanbevolen verloop van de stromingsblokkering is, zie Figuur E-3:

- $A_p/A_l = 0,2$  vanaf de kribkop (rivier) tot een afstand tweemaal de lokale waterdiepte,
- $A_p/A_l = 0,3$  vervolgens over een afstand tweemaal de lokale waterdiepte,
- $A_p/A_l = 0,4$  vervolgens over een afstand tweemaal de lokale waterdiepte,
- $A_p/A_l = 0,5$  vervolgens over een het overblijvende deel tot de kribwortel (uiterwaard).

De afstand tussen de doorlatende kribben is met de dissipatiehoek te bepalen. Voor het ontwerp kan aangehouden worden een afstand tussen de kribben, zie Figuur E-3, voor rechte oevers 4 maal de kriblengte en voor gekromde oevers 2 à 3 maal de kriblengte. De kriblengte is de afstand van de kribkop tot aan de kribwortel.

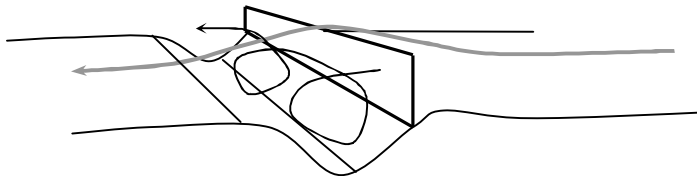


Figuur E-3 Verloop stromingsblokkering (boven) en definitie kriblengte en kribafstand (beneden)



## Bijlage F: Ontwerp zandspiraalbuizen

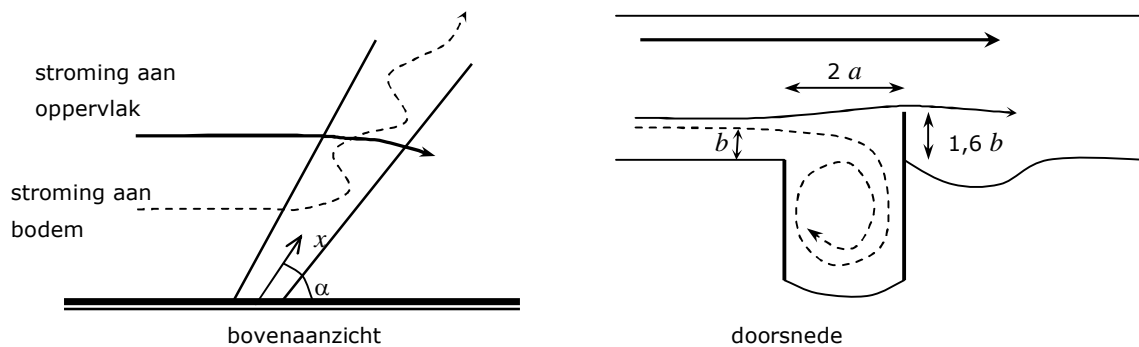
In het rapport van Moges (2006) is een methode beschreven hoe zandspiraalbuizen ontworpen kunnen worden. Het principe van een bodemscherm dat scheef ten opzichte van de hoofdstroomrichting is opgesteld, is dat achter het scherm een spiraalstroming wordt opgewekt die langs het scherm is gericht, zie Figuur F-1. Door de wervels opgewekt achter de het scherm zal de zandbodem eroderen. Voor het scherm zal door stroomvertraging nabij de bodem meegevoerd sediment worden afgezet.



Figuur F-1 Principe werking van een bodemscherm

Met het plaatsen van een tweede lager scherm voor een bodemscherm ontstaat een 'stroombuis' die sedimentrijk water nabij de bodem afleidt naar bijvoorbeeld het midden van een rivier. Nabij de oever passeert dan minder bodemsediment. Een toepassing die bij een haveningang gewenst is.

De schermen sturen de stroming nabij de bodem naar de rivieras en het water nabij het wateroppervlak naar de oever. De afstand tussen beide schermen moet toenemen in de richting van de rivieras aangezien het debiet toeneemt dat door de 'buis' naar de rivieras wordt gevoerd.



Figuur F-2 Principe werking van een zandspiraalbuis

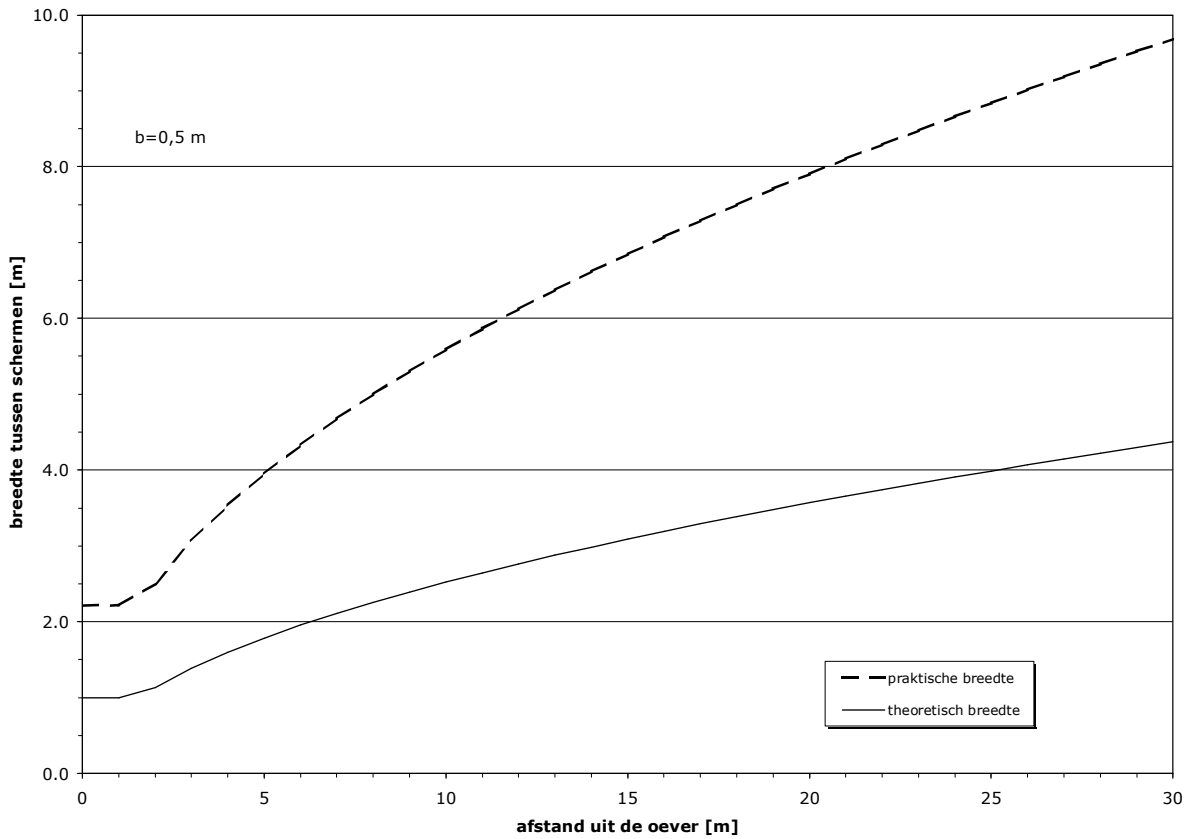
De afstand  $2a$  tussen de schermen en de hoogte  $b$  van de stroomlijn boven de bodem die net bijdraagt aan de spiraalstroming tussen de schermen, zijn als volgt gerelateerd,

$$a = \sqrt{\frac{bx}{\pi}} \text{ als } \sqrt{\frac{bx}{\pi}} > b \text{ en } a = b \text{ als } \sqrt{\frac{bx}{\pi}} \leq b \quad (\text{F-1})$$

met  $x$  als de afstand langs de as van de 'buis' vanuit de oever. Dat betekent dat over de afstand,

$$0 < x \leq 3b \text{ de afstand tussen de schermen constant } 2a = 2b \text{ is en}$$

$$x > 3b \text{ de afstand tussen de schermen } 2a = \sqrt{b \cdot x / \pi} = 1,13 \sqrt{b \cdot x} \text{ is, zie Figuur F-3.}$$



Figuur F-3 Voorbeeld van verloop van schermen van een zandspiraalbuis

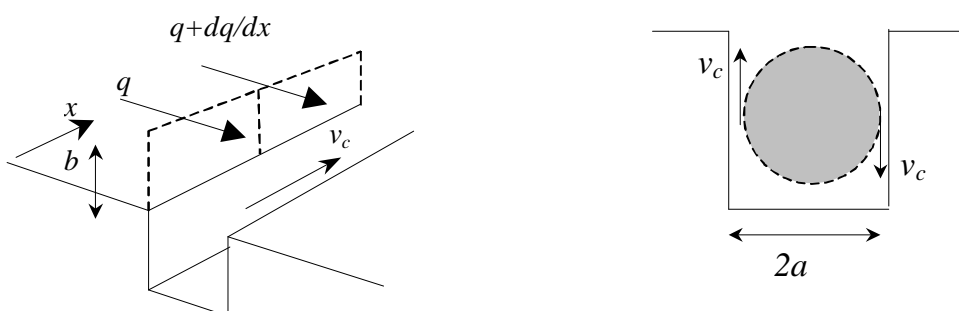
De richting van de schermen ten opzichte van de oeverlijn is van belang voor het optimaliseren van de stroomsnelheid tussen de schermen en de snelheid boven de schermen. Het blijkt dat een optimum optreedt voor een hoek van  $\alpha = 45^\circ$ , zie Figuur F-2.

De grootte van het debiet dat tussen de schermen stroomt is als volgt te schatten. Het debiet per eenheid van breedte dat de zandspiraalbuis instroomt komt uit de laag onder de stroomlijn die op een afstand  $b$  boven de bodem ligt. De debietverandering langs de  $x$ -richting is,

$$\frac{dq}{dx} = b \cdot v_n \tag{F-2}$$

Het debiet door de zandspiraalbuis is de circulatiesnelheid in de vortex maal het doorstroomoppervlak in de zandspiraalbuis,

$$q = v_c \cdot \pi a^2 \tag{F-3}$$



Figuur F-4 Definities debiet door zandspiraalbuis



Na substitutie van vergelijking (F-3) in (F-2) resteert,

$$a^2 = \frac{b}{\pi \cdot v_c} \int v_n \cdot dx \quad (\text{F-4})$$

In de ideale situatie kan de snelheid  $v_c$  in de as van de zandspiraalbuis, onder  $45^\circ$  met de hoofdstroomrichting,  $v_c = v_n / \sqrt{2}$  zijn. In de praktijk zal de snelheid parallel in de zandspiraalbuis door verliezen lager zijn dan deze waarde, een factor  $f_v (< 1)$ , dus  $v_c = f_v \cdot v_n / \sqrt{2}$ .

Daarnaast zal niet al het bodemtransport dat de zandspiraalbuis bereikt ook daadwerkelijk via de buis worden afgevoerd, een gedeelte wordt over de zandspiraalbuis getransporteerd. Voor die reductie wordt de factor  $f_s (< 1)$  geïntroduceerd, die de ontwerpbreedte  $a_o$  van de buis reduceert tot  $a_o = f_s \cdot a$ .

Als beide factoren  $f_v$  en  $f_s$  constant zijn langs de zandspiraalbuis, dan luidt de oplossing van vergelijking (F-4),

$$(a \cdot f_s)^2 = \frac{\sqrt{2} \cdot b \cdot x}{\pi \cdot f_v} \quad \text{oftewel} \quad a = \frac{0,67}{f_s \cdot \sqrt{f_v}} \sqrt{b \cdot x} \quad (\text{F-5})$$

Met bijvoorbeeld  $f_v = 0,8$  en  $f_s = 0,6$  is het praktisch verloop van de breedte van de zandspiraalbuis  $2a \approx 2,5 \sqrt{(b \cdot x)}$ , zie Figuur F-3.

De ontwerpstappen voor zandspiraalbuizen zijn:

- Verzamel de lokale riviergegevens, karakteristiek afvoerverloop over het jaar, korrelsamenstelling bodemmateriaal, waterdiepteverloop over het jaar. Bereken voor verschillende stromingsomstandigheden  $U$  = gemiddelde stroomsnelheid [m/s],  $u_* (= \sqrt{ghi})$  [m/s].
- Neem 10 verschillende fracties ( $D_5, D_{15}, D_{25}, \dots, D_{95}$ ) van de zeefkromme. Bereken de valsnelheid  $w_s$  per korrelfractie.
- Neem de 'performance factor'  $\beta = 0,625 h_1/h_2$  met  $h_1$  = afstand bovenkant bovenstroomse scherm tot bovenkant benedenstroomse scherm [m],  $h_2$  = waterdiepte [m]. Bepaal met de parameters  $U/u_*$  en  $w_s/u_*$  uit Figuur F-5 voor alle 10 korreldiameters de performance ratio (PR). Een hoge ratio betekent het efficiënt vangen van sediment.
- Optimaliseer de hoogte van het benedenstroomse scherm. Een hoger scherm resulteert in een hogere performance ratio, maar meer stromingsweerstand.
- Bepaal de oriëntatie van de schermen ten opzichte van de hoofdrichting  $45^\circ$  ten opzichte van de oeverlijn.
- De lengte van de schermen is niet onbeperkt, de constructie moet zo ver doorlopen dat het sediment via de zandspiraalbuis voldoende ver is afgevoerd naar de rivieras en geen probleem kan opleveren bij de haveningang.
- Om een zandspiraalbuis te laten functioneren moet de stroomsnelheid voldoende hoog zijn om het bodemmateriaal in beweging te houden. Een praktische maat daarvoor is de eis dat  $v_n > 3 U_{cr}$ , met  $U_{cr}$  de kritieke stroomsnelheid voor bewegen van het bodemmateriaal.

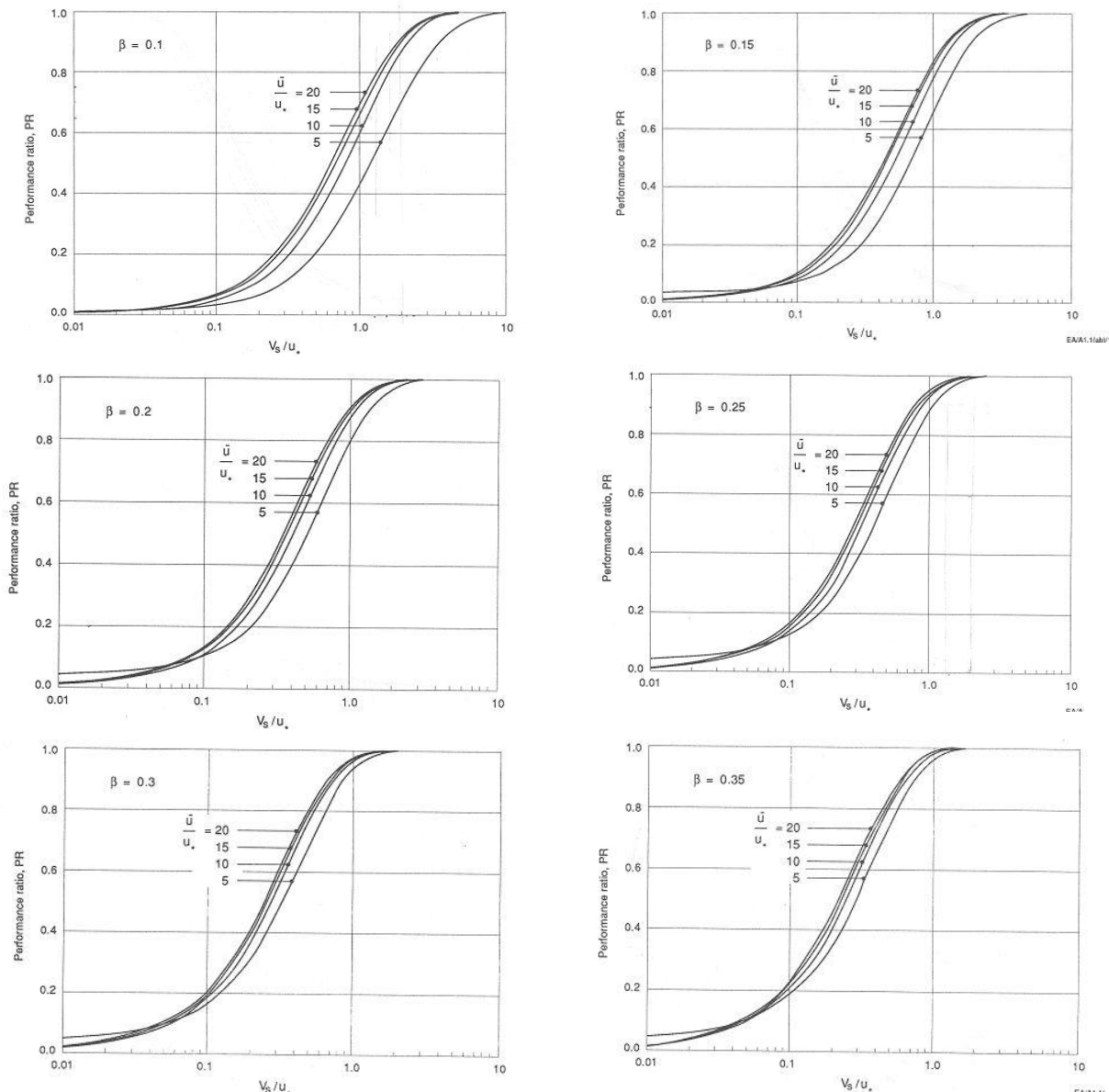
De valsnelheid  $w_s$  van korrels in water met een diameter  $D$  is te berekenen met de volgende formule,

$$w_s = \frac{10 \cdot v}{D} \left[ \left\{ 1 + \frac{g \cdot \Delta \cdot D^3}{100 \cdot v^2} \right\}^{0,5} - 1 \right] \quad \text{geldig voor } 100 \mu\text{m} \leq D \leq 1000 \mu\text{m} \quad (\text{F-6})$$

met  $\nu$  = kinematische viscositeit van water [ $m^2/s$ ],  $g$  = zwaartekrachtsversnelling [ $m/s^2$ ],  $\Delta$  = relatieve korrel dichtheid [-] ( $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$ ),  $\rho$  = dichtheid water [ $kg/m^3$ ],  $\rho_s$  = dichtheid sediment [ $kg/m^3$ ].

Enkele gangbare waarden voor de parameters zijn:

- $\nu = 10^{-6} m^2/s$  bij 20°C,  $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6} m^2/s$  bij 10°C,  $\nu = 1,57 \cdot 10^{-6} m^2/s$  bij 4°C,
- $g = 9,81 m/s^2$ ,
- $\rho = 1000 kg/m^3$  bij 4°C,
- $\rho_s = 2650 kg/m^3$  voor zand en dus is  $\Delta = 1,65$ .



Figuur F-5 Performance ratio voor  $\beta = 0,1$  t/m  $\beta = 0,35$

De eis voor een goed werkende zandspiraalbuis  $v_n > 3u_{cr}$  is uit te werken met de relatie opgesteld door Van Rijn voor de Shields-parameter en de relatie tussen de kritieke stroomsnelheid  $u_{cr}$  en de kritieke schuifspanningsnelheid  $u_{*cr}$ . Van Rijn geeft de volgende relatie tussen de dimensieloze schuifspanningsnelheid  $\theta_{cr}$  en de dimensieloze korrel diameter  $D_*$ ,

$$\begin{aligned}
D_* \leq 4 &\rightarrow \theta_{cr} = 0,24 \cdot D_*^{-1} \\
4 < D_* \leq 10 &\rightarrow \theta_{cr} = 0,14 \cdot D_*^{-0,64} \\
10 < D_* \leq 20 &\rightarrow \theta_{cr} = 0,04 \cdot D_*^{-0,1} \\
20 < D_* \leq 150 &\rightarrow \theta_{cr} = 0,013 \cdot D_*^{0,29} \\
D_* > 150 &\rightarrow \theta_{cr} = 0,055
\end{aligned}
\tag{F-7}$$

Waarin,

$$D_* = D_{50} \cdot (\Delta \cdot g / \nu^2)^{1/3} \quad [-] \tag{F-8}$$

$$\theta_{cr} = \frac{u_{*cr}^2}{g \cdot \Delta \cdot D_{50}} \quad [-] \tag{F-9}$$

en  $D_{50}$  = korreldiameter waarvoor 50% van het bodemmateriaal fijner is [m],  $D_{90}$  = korreldiameter waarvoor 90% van het bodemmateriaal fijner is [m],  $\Delta$  relatieve dichtheid  $(\rho_s - \rho)/\rho$ ,  $\rho$  = dichtheid water [kg/m<sup>3</sup>],  $\rho_s$  = dichtheid sediment [kg/m<sup>3</sup>],  $g$  = zwaartekrachtsversnelling [m/s<sup>2</sup>].

De gemiddelde diepte-gemiddelde kritische stroomsnelheid  $U_{cr}$  volgt uit de Chézy-vergelijking,

$$U_{cr} = C \cdot \sqrt{h \cdot i} \quad \text{waarin } C = 18 \log(12h/k) \tag{F-10}$$

met  $h$  = waterdiepte [m]  $i$  = waterspiegelverhang [-] en  $k$  = Nikuradse ruwheidshoogte [m]. Met de definitie voor de schuifspanningssnelheid  $u_* = \sqrt{ghi}$  is vergelijking (F-10) te schrijven als,

$$\frac{U_{cr}}{u_{*cr}} = \frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{18}{\sqrt{g}} \log\left(\frac{12h}{k}\right) \tag{F-11}$$

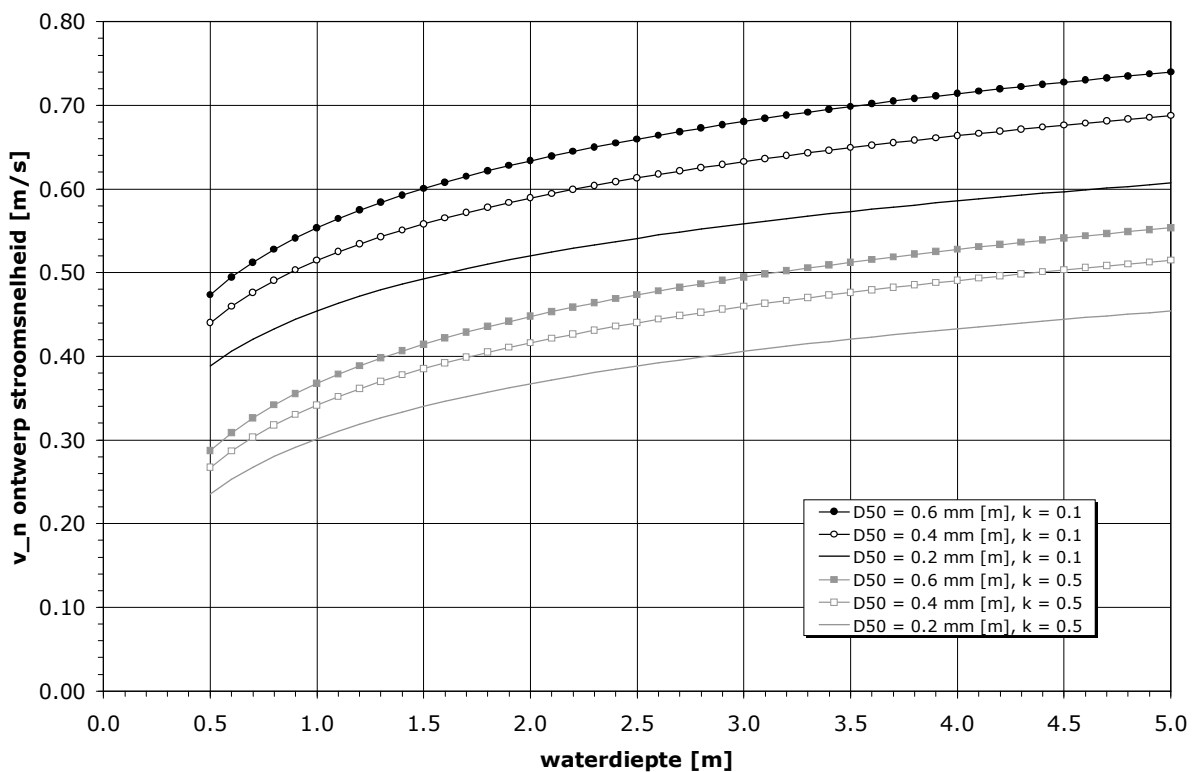
die na substitutie van vergelijking (F-9) overgaat in,

$$U_{cr} = 5,75 \cdot \sqrt{\theta_{cr} \cdot g \cdot \Delta \cdot D_{50}} \cdot \log\left(\frac{12h}{k}\right) \tag{F-12}$$

De voorwaarde voor een goed werkende zandspiraalbuis luidt dan uiteindelijk,

$$v_n > 3 \cdot U_{cr} \quad \text{oftewel } v_n > 17,3 \cdot \sqrt{\theta_{cr} \cdot g \cdot \Delta \cdot D_{50}} \cdot \log\left(\frac{12h}{k}\right) \tag{F-13}$$

In Figuur F-6 zijn wat voorbeelden gegeven voor de ontwerpstroomsnelheid  $v_n$  bij verschillende waterdiepte  $h$ , korreldiameters  $D_{50}$  en bodemruwheid  $k$  (Nikuradse ruwheidshoogte).



Figuur F-6 Afhankelijkheid ontwerp stroomsnelheid voor korrel diameter, waterdiepte en korrelruwheid

Bij het plaatsen van meerdere zandspiraalbuizen stroomafwaarts achter elkaar kunnen de volgende twee ontwerpregels worden gebruikt,

- de aanpassingslengte voor een verstoorde stroming,
- de aanpassingslengte voor een verstoord evenwichtssedimenttransport.

**Aanpassingslengte stroming**

Voor het bepalen van de afstand tussen twee zandspiraalbuizen wordt de aanpassingslengte  $L_a$  gebruikt voor stroming,

$$L_a = \frac{C^2 h}{2g} \tag{F-14}$$

met  $C$  = Chézy-coëfficiënt [ $m^{1/2}/s$ ],  $h$  = lokale waterdiepte [ $m$ ],  $g$  = zwaartekrachtsversnelling [ $m/s^2$ ]. De aanpassingslengte is een karakteristieke lengte van een proces waarvan het verloop over een afstand kan worden benaderd met een e-macht ( $\sim \exp[-x/L_a]$ ). Over een afstand  $0,5L_a$  is 40% van de aanpassing van de stroming gedaan, over een afstand van  $0,7L_a$  is dat 50%, over een afstand  $L_a$  is dat 63% en over een afstand  $2L_a$  is dat 87%.

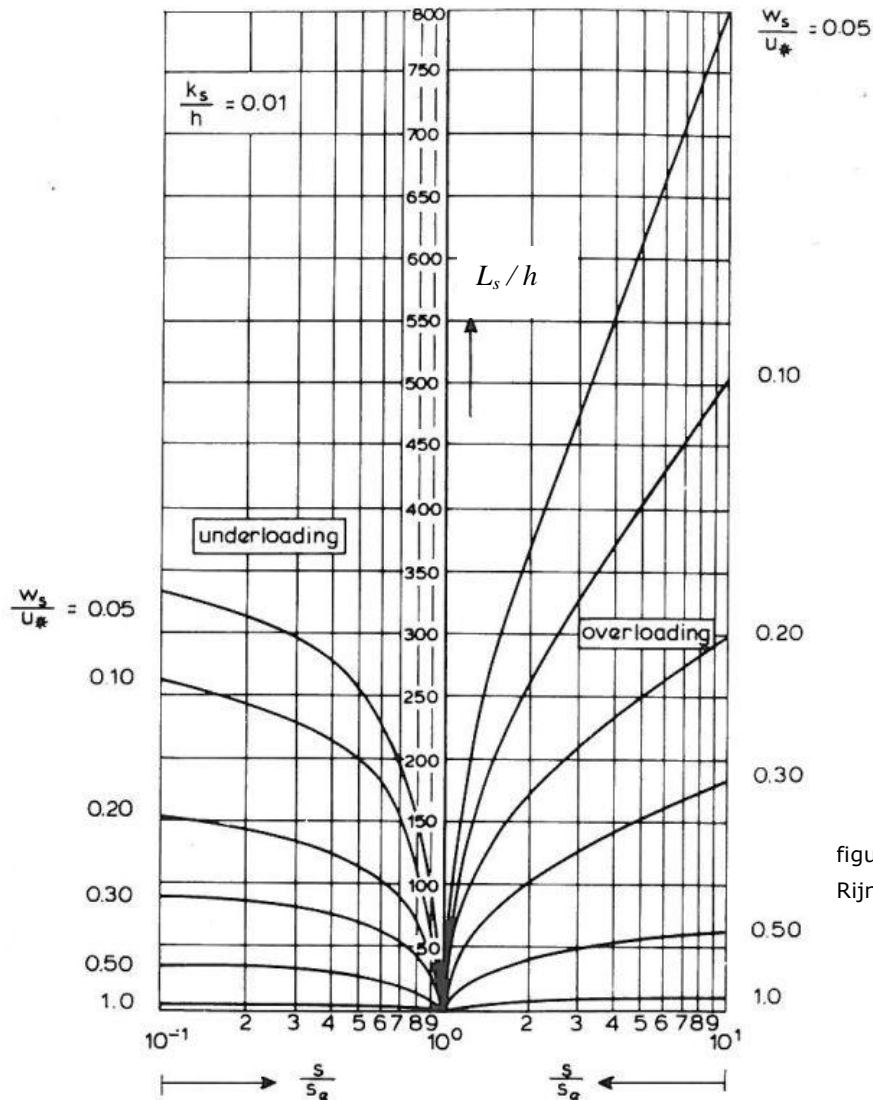
De benedenstroomse wand van de zandspiraalbuis steekt boven de bodem uit en zal daardoor extra stromingsweerstand veroorzaken. Dat verhoogt over enige afstand de  $C$ -waarde. Verder is het belangrijk dat het sedimenttransport benedenstrooms van de eerste zandspiraalbuis voordat het weer hersteld is, grotendeels wordt gevangen in de volgende zandspiraalbuis. Dus enige aanpassingslengte is wenselijk, maar niet een te grote lengte. Voorlopig wordt een afstand voorgesteld van  $L_o = 0,5L_a$  waarvoor 40% van de stroming weer is aangepast aan de evenwichtssituatie. De ontwerpaafstand  $L_o$  tussen twee zandspiraalbuizen is,

$$L_o = 0,5 \frac{C^2 h}{2g} \tag{F-15}$$

Een opmerking bij de stroming nabij de bodem over de zandspiraalbuis betreft het veranderen van de stroomrichting ten gevolge van het plotselinge verschil in stroomsnelheid. Boven de zandspiraalbuis neemt de stroomsnelheid af en zal daardoor wat van richting veranderen. Dit effect is te vergelijken met 'het breken' van een lichtbaan bij overgang van het ene materiaal naar het andere. Vermoedelijk zal de stromingsrichting in de richting van de rivieras worden afgebogen. Het effect is vooralsnog niet te kwantificeren en onduidelijk is of het een gunstig of ongunstig effect is.

**Aanpassingslengte sedimenttransport**

Het sedimenttransport nabij de bodem wordt in de zandspiraalbuis worden gevangen. Benedenstrooms van de buis wordt door de stroming bodemsediment opgenomen en getransporteerd. Over enige afstand zal het transport van bodemmateriaal toenemen totdat de evenwichtstransportcapaciteit is bereikt. Hoe groter het verschil tussen het lokale (lagere) transport  $S$  en het evenwichtstransport  $S_e$  hoe groter de benodigde afstand  $L_s$  (aanpassingslengte) is om  $S_e$  te bereiken.



figuur uit Van Rijn (1987)

Figuur F-7 Aanpassingslengte voor sedimenttransport na verstoring van het evenwichtstransport

Voor de volgende zandspiraalbuis moet het sedimenttransport zo groot mogelijk zijn, waarmee een zo groot mogelijke hoeveelheid sediment in die buis wordt gevangen. De eis is dat  $L_s \leq L_o$ .

De aanpassingslengte voor het sedimenttransport  $L_s$  hangt af van de valsnelheid van het bodemmateriaal, hoe fijner het materiaal hoe groter  $L_s$ , en hoe groter de bodemschuifspanning  $\tau_b$ , hoe groter  $L_s$ . In Van Rijn (1987) is de aanpassingslengte  $L_s$  gegeven als functie van  $S/S_e$ , de waterdiepte  $h$ , de valsnelheid  $w_s$ , zie vergelijking (F-6), en de schuifspanningssnelheid, waarin  $k$  de bodemruwheidshoogte is,

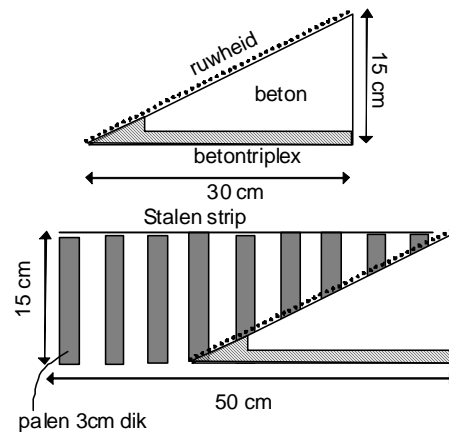
$$u_* = \frac{u}{C} \cdot \sqrt{g} \quad , \quad (\tau_b = \rho \cdot u_*^2) \quad \text{waarin } C = 18 \cdot \log\left(\frac{12h}{k}\right) \quad \text{(F-16)}$$

met  $u$  de lokale gemiddelde stroomsnelheid [m/s] en de  $\rho$  dichtheid van water [kg/m<sup>3</sup>]. In Figuur F-7 is de relatie weergegeven voor de verhouding  $k/h = 0,01$ . De aanpassingslengte voor te laag sedimenttransport,  $S/S_e < 1$ , staat in de linkerzijde van de figuur.

Voorbeeld:

Als 25% van het sedimenttransport wordt gevangen in de zandspiraalbuis, is  $S/S_e = 0,75$ . De waterdiepte  $h = 2$  m, de korreldiameter 200  $\mu\text{m}$ , de Chézy-coëfficiënt is 45 m<sup>1/2</sup>/s, de gemiddelde snelheid  $u = 0,5$  m/s, waarmee  $w_s/u_* = 0,75$  hetgeen resulteert in een aanpassingslengte van circa 20 maal de lokale waterdiepte,  $L_s = 40$  m. Als 50% van het sedimenttransport wordt gevangen in de buis is de aanpassingslengte  $L_s = 50$  m en als 75 % van het sedimenttransport wordt gevangen in de buis is de aanpassingslengte  $L_s = 70$  m.



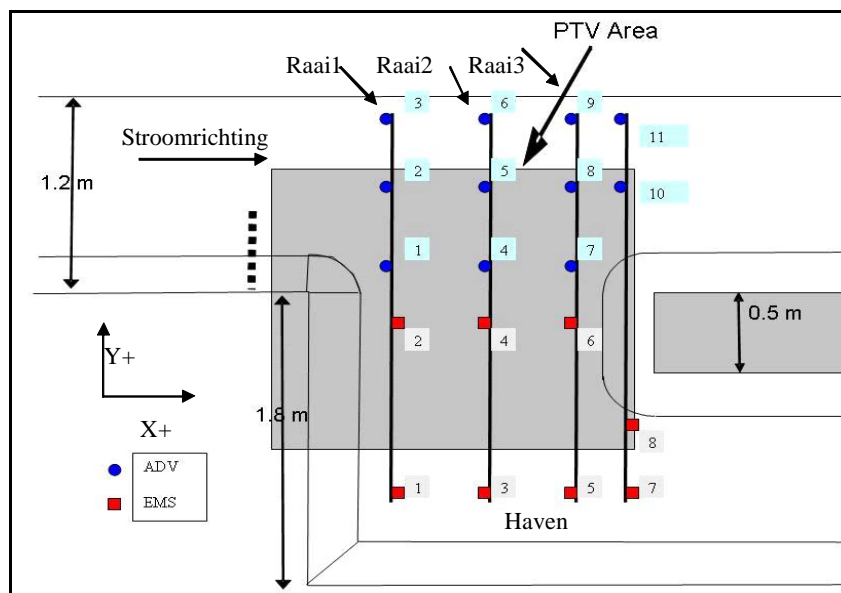


Figuur G-2 Details van de taluds en palenrij toegepast in het schaalmodel

**Uitvoering:**

Tijdens het experiment zijn de volgende grootheden gemeten:

- debiet, waterstand, waterstandsverschil tussen boven- en benedenstrooms van de haven,
- grootschalige stromingspatronen van het vrije oppervlak in en rondom de havenmond met behulp van video-opnamen en particle-tracking velocimetry (PTV),
- turbulentiemetingen op de halve waterdiepte op een aantal raaien door rivier en havenmond met behulp van een 3D akoestische Doppler snelheidsmeter (ADV) en een elektromagnetische snelheidsmeter (EMS),
- tijdens de experimenten is de positie van de palenrij gevarieerd van 0, en 0.35m tot 0.75m bovenstrooms van de havenmond en vergeleken met de situatie zonder palenrij,
- de palenrij zelf heeft in alle gevallen een lengte tussen 0.35 en 0.42m waarbij het aantal palen 7 was en in een enkele situatie gereduceerd was tot 6 of 5.



Figuur G-3 Opstelling meetapparatuur in en boven het schaalmodel



### G.3 Meetopstelling, meetdata, analyses

De meetopstelling blijkt geschikt voor het gestelde doel. Er is goed een stationaire stroming in te stellen die turbulent is en een duidelijke circulatie in de haven teweegbrengt. Het model biedt ruimte tot variatie van positie en vorm van de palenrij en biedt ook flexibiliteit in de haven geometrie. Ook is het mogelijk via de haven water af te voeren (Amer-centrale). Een belangrijk interpretatieprobleem wordt veroorzaakt door de geringe breedte van de stroming voor de haven langs. Het plaatsen van de palenrij reduceert het doorstroomd oppervlak relatief sterk waardoor de locale snelheid in de rivier toeneemt. Deze toename zou minder geweest zijn wanneer de breedte van de rivier groter was. Gezien de beperkte breedte van de goot is dit onvermijdelijk. De situatie met en zonder palenrij is daarom niet zondermeer te vergelijken. Het effect van versnelling en vertraging rondom de palenrij moet meegewogen worden. Voor het valideren van het rekenmodel voor dezelfde geometrieën maakt dit niet veel uit omdat het genoemde effect ook in de berekeningen naar voren zal komen.

De EMS en ADV data, gemeten halverwege de waterkolom, zijn bruikbaar en geven een aanvulling op de metingen aan het vrije oppervlak. Met name de ADV data lenen zich voor een gedetailleerde bepaling van de turbulentie-eigenschappen in de menglaag.

### G.4 Rapportage en eerste analyse van de stagières

*(Gebaseerd op: maandverslag 3+4 en eindverslag Snoep en maandverslag 2+4 en eindverslag Roels. De belangrijkste conclusies uit de rapportage van Snoep [S] en Roels [R] zijn hieronder samengevat (cursief) en voorzien van opmerkingen Wim Uijttewaal [WU]. [S+R])*

De studenten Snoep en Roels hebben in het kader van hun stage voor de Hogeschool Utrecht meegewerkt aan het experimentele onderzoek. Een belangrijk deel van de stage is gedaan bij HKV met als doel ervaring op te doen door mee te draaien in een project van HKV. Een onderdeel hiervan bestond dus uit het meten in het laboratorium voor Vloeistofmechanica van de TUDelft.

De verslagen geven de ervaringen van de studenten tijdens hun stage weer en bevatten beperkte informatie over de metingen. Het valt op dat de verslaglegging beperkt is wat betreft diepgang en omvang waarbij Snoep iets uitgebreider rapporteert en dieper ingaat op de laboratoriumproeven. De meetdata waren bij het schrijven van deze rapportages slechts gedeeltelijk verwerkt en conclusies zijn gebaseerd op incomplete gegevens van de éénpunts-metingen in het havenmodel. Er zijn duidelijke verschillen waar te nemen in de snelheden in de havenmond als gevolg van de aanwezigheid van de palenrij en de locatie ervan ten opzichte van de havenmond. Het vergelijken van de snelheden op enkele punten leidt makkelijk tot misinterpretatie van de verschijnselen omdat een enkel punt niet voldoende zegt over het stroombeeld dat de uitwisseling bepaalt. Het is een beetje teleurstellend te constateren dat de effecten van de palenrij op de uitwisseling niet zo sterk lijken te zijn als verwacht vanuit ervaringen met eerder studies en pilots. Dit kan te maken hebben met details van de geometrie als taludhelling en ruwheid. Een voorzichtige conclusie die volgt uit de rapportages is dat de uitwisseling door aanbrengen de palenrij verminderd kan worden door ofwel een lange palenrij op 0.75m bovenstrooms van de haven ingang te plaatsen, of een kortere direct bij de haveningang. De reductie van het uitgewisselde debiet zal ergens tussen de 10 en 30% liggen. Voor een betere interpretatie en nauwkeuriger schatting zal het nodig zijn het volledige stroombeeld beschikbaar te hebben en deze te vergelijken met berekeningen.

Bij de analyse van de meetresultaten van de schaalmodelproeven is gekeken naar de stroomsnelheden in x- en y-richting op 3 locaties ( EMS 2, 4 en 6) in de havenmond waar

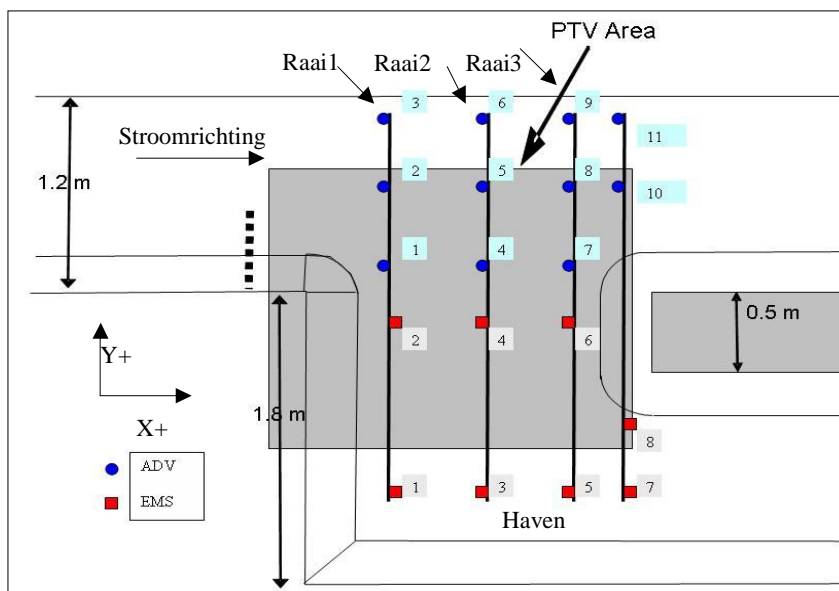
een EMS meetinstrument was opgesteld, Figuur 1. De beoordeling van de stroomsnelheden zijn als volgt:

- Y-as: Bij de Y-as geldt dat hoe groter het absolute gemeten verschil tussen punt 2 en punt 6 van de EMS in de menglaag, hoe kleiner de transportcapaciteit van het water is geworden en dus hoe meer sediment heeft kunnen bezinken. Oftewel hoe steiler de grafiek loopt hoe slechter de oplossing.

[WU] Hierbij valt op te merken dat een groot snelheidsverschil een sterke neer in de havenmond representeert wat duidt op een grote uitwisseling. Het meest gunstig lijkt de situatie waarbij een het snelheidsverschil klein is en ook de absolute snelheid laag is.

- X-as: Bij de X-as geldt dat hoe groter het verschil in snelheid tussen de rivier en de haven hoe sterker de wervelvorming en turbulentie. Dit betekent meer uitwisseling van sediment tussen de haven en de rivier. Hier geldt dus ook hoe steiler de grafiek hoe slechter de oplossing werkt om sediment tegen te gaan.

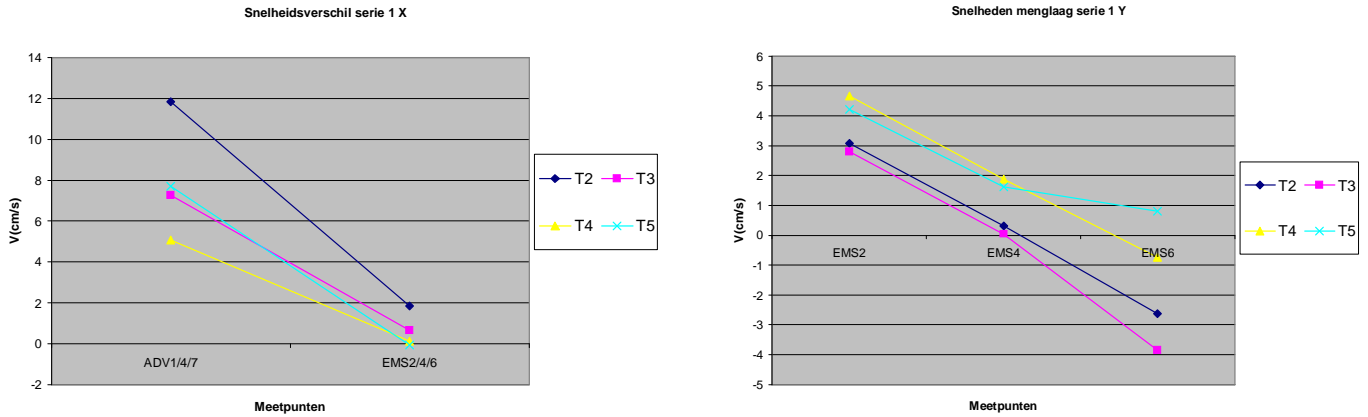
[WU] Ook hier is een klein snelheidsverschil gekoppeld aan een lage absolute snelheid gunstig.



Figuur G-4 Meetlocaties in het schaalmodel

Het resultaat van de analyse van de gemeten stroomsnelheden is hieronder samengevat. In de x-richting zijn de snelheden gemeten met de ADV 1, 4 en 7 gemiddeld en die gemeten met de EMS 2, 4 en 6. Voor de Y-snelheden zijn alleen de snelheden gemeten met de EMS 2, 4 en 6 gebruikt.

De resultaten van de meetserie met een palenrij die 50% doorlatend is, uit 7 palen bestaat en op drie verschillende afstanden van de havenmond is geplaatst, zijn in Figuur G-5 weergegeven.



Figuur G-5 Resultaten x- en y-stroomsnelheden bij verschillende locaties palenrij

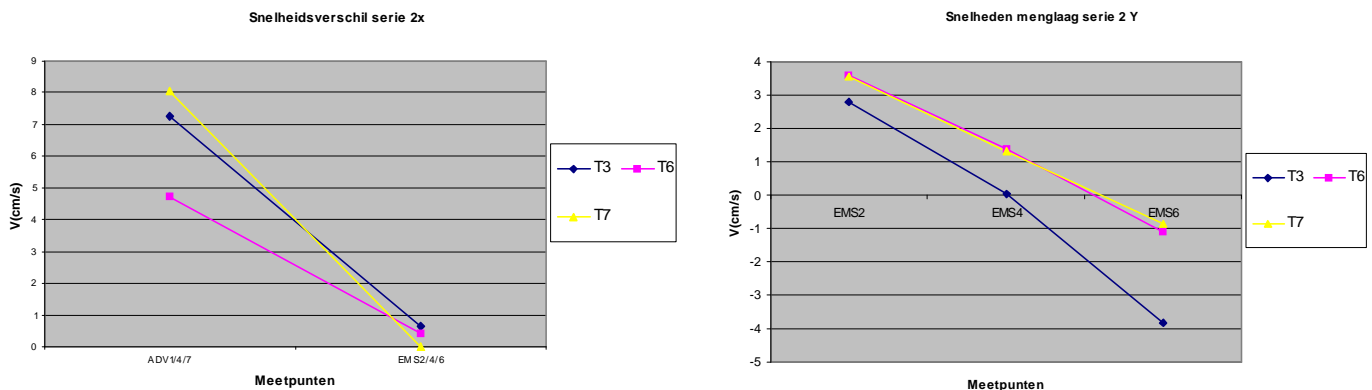
Situatie	Waardering x-snelheid	Waardering y-snelheid	totale score
Zonder palenschermb (T2)	4 <sup>de</sup>	3 <sup>de</sup>	7
Met palenschermb op 0 cm van de havenmond (T4)	1 <sup>ste</sup>	2 <sup>de</sup>	<b>3</b>
Met palenschermb op 35 cm van de havenmond (T3)	2 <sup>de</sup>	4 <sup>de</sup>	6
Met palenschermb op 70 cm van de havenmond (T5)	3 <sup>de</sup>	1 <sup>ste</sup>	4

Tabel G-1 Waardering opstellingen bij verschillende locaties palenrij

Een palenrij met een doorlatendheid van 50% vlak voor de haveningang geplaatst (0 cm), is het meest effectief gezien de gestelde criteria.

[WU] Het zondermeer optellen van de waarderingen tot een totale score is niet goed te verantwoorden en leidt slechts tot een grove indicatie. Een completere beschrijving van het stroombeeld is nodig om de juiste conclusie te kunnen trekken. De rechter grafiek laat voor T4 en T5 een asymmetrische (t.o.v. snelheid 0) doorsnede zien van de neer in de havenmond. Dit is moeilijk te interpreteren zonder het gehele stroombeeld te kennen.

De resultaten van de meetserie met een palenrij die variabel doorlatend is (50%, 67% en 75%) uit 7, 6 of 5 palen bestaat en op een vaste afstand van 35 cm voor de havenmonding is geplaatst, zijn in Figuur G-6 weergegeven.



Figuur G-6 Resultaten x- en y-stroomsnelheden bij verschillend aantal palen in palenrij

Situatie	Waardering x-snelheid	Waardering y-snelheid	totale score
Zonder palenscherm 7 palen (T2)	4 <sup>de</sup>	3 <sup>de</sup>	7
Met palenscherm 35 cm 7 palen (T3)	2 <sup>de</sup>	4 <sup>de</sup>	6
Met palenscherm 35 cm 6 palen (T6)	1 <sup>ste</sup>	2 <sup>de</sup>	<b>3</b>
Met palenscherm 35 cm 5 palen (T7)	3 <sup>de</sup>	1 <sup>ste</sup>	4

Tabel G-2 Waardering opstellingen bij verschillend aantal palen in palenrij

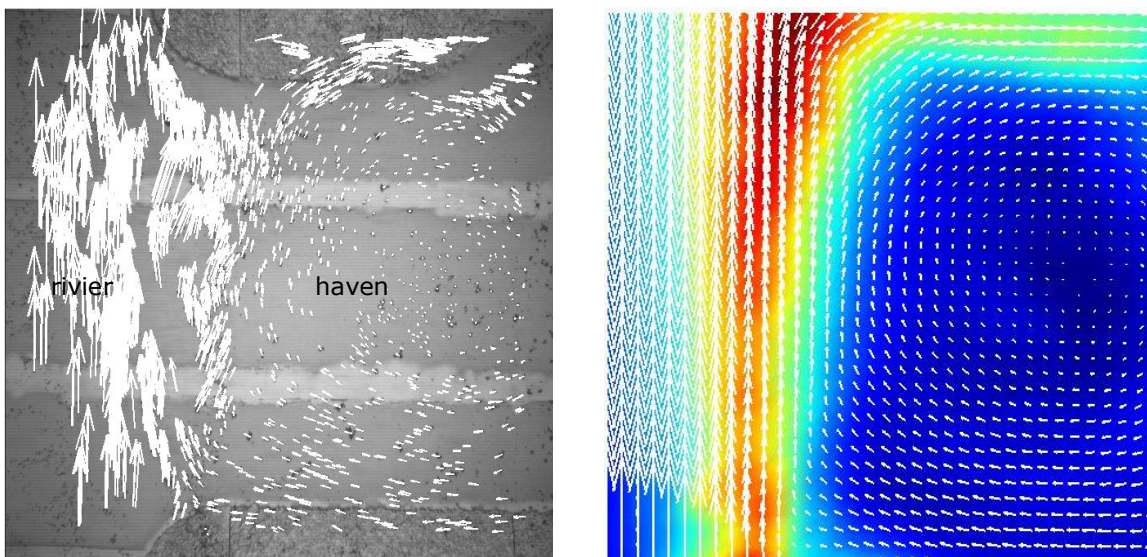
Een palenrij met een doorlatendheid van 67% geplaatst 35 cm voor de haveningang, is het meest effectief gezien de gestelde criteria.

[WU] Een iets grotere doorlatendheid lijkt inderdaad een gunstig effect te hebben. Dit wil niet zeggen dat met T6 de optimale configuratie gevonden is er zijn meer varianten mogelijk. Ook zou weer het totale stroombeeld bekeken moeten worden.

### G.5 Lopende Activiteiten

#### Verdere uitwerking experimentele data

Op dit moment worden de meetdata verwerkt en bijbehorende rapportage opgesteld van het gehele experiment door een student die afstudeert aan de TUDelft Jessica Castillo Rodriguez. Dit omvat ook de drijvermetingen (PTV) die gedaan zijn om het stroombeeld van de oppervlaktebeweging rondom de haven mond te bepalen. Enkele voorbeelden zijn weergegeven in Figuur G-7. De linker figuur is een bovenaanzicht van de haveningang waarin havenhoofden en drijvertjes te zien zijn met bijbehorende snelheidsvector, de rivier stroomt aan de linker zijde. De rechter figuur is een vectorveld van de tijdgemiddelde snelheid met op de achtergrond in kleur de turbulentie-intensiteit die vooral groot is in de menglaag en rondom het benedenstroomse stuwpunt (rood is hoge intensiteit en blauw is laag).



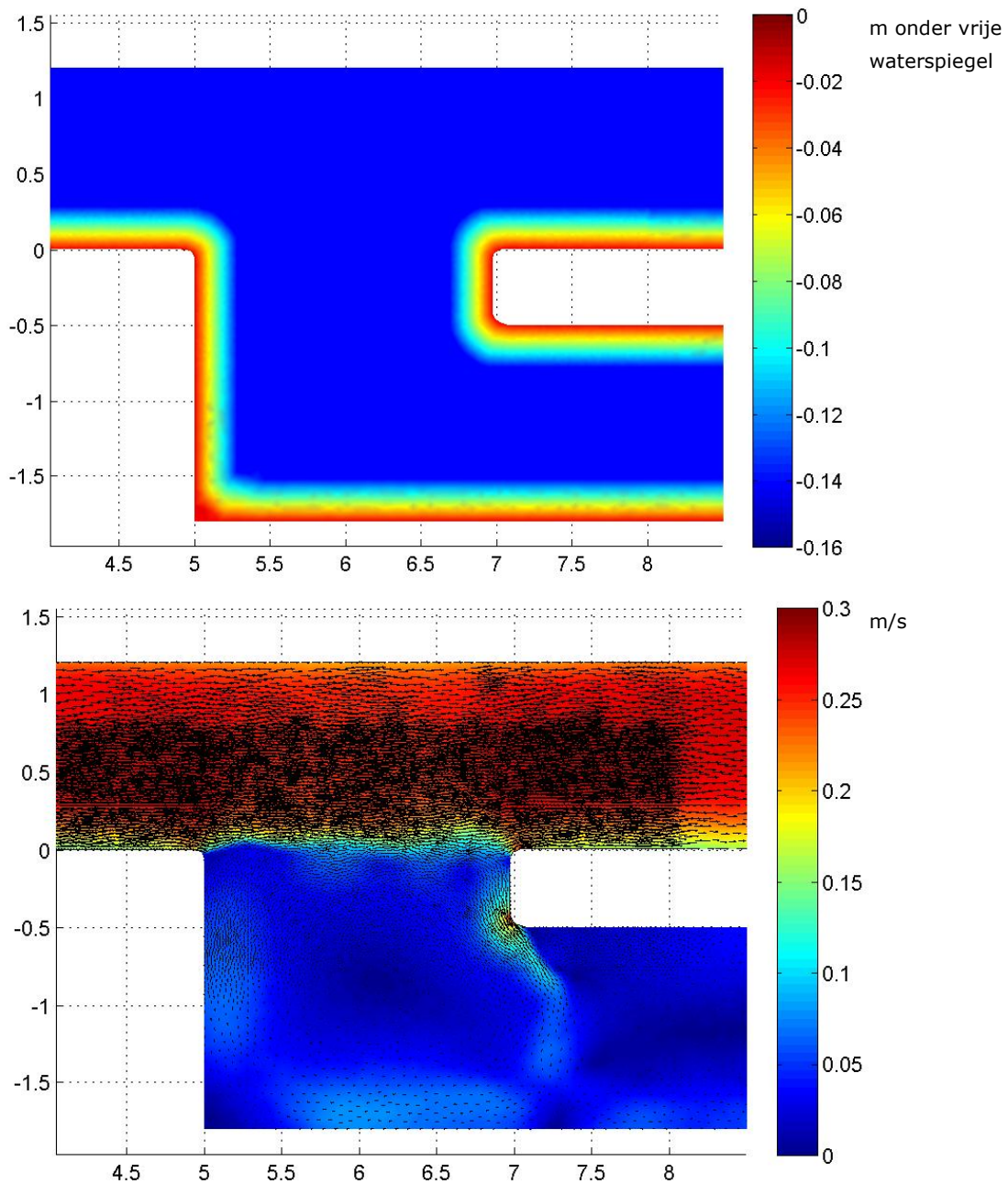
Figuur G-7 Voorbeeld drijvermetingen in het schaalmodel

Het is mogelijk de structuur van de stroming zichtbaar te maken doordat in het gehele vlak de snelheden instantaan bekend zijn. Omdat er met drijvers gewerkt wordt, is dit uiteraard de horizontale snelheid aan het oppervlak op die plaatsen waar zich drijvers bevinden. Verticale snelheden tonen zich als gebieden waar de deeltjes naar elkaar toe (stroomnaad) of van elkaar af bewegen (opwelling). Met name in de menglaag zijn er gebieden te vinden waar de drijvers weggeduwd worden door grote wervelstructuren die naar boven komen. Een eerste analyse laat

zien dat de stroming de haven in, bij het benedenstroomse stuwpunt, redelijk uniform over de verticaal verdeeld is terwijl de stroming de haven uit het sterkst is bij de bodem. Ook lijkt het mogelijk de sterkte van de neer in de haveningang te gebruiken als indicator voor uitwisseling van impuls en massa.

#### Numerieke simulaties met FinLab

Van het fysisch schaalmodel is ook een numeriek model gemaakt waar resultaten van beschikbaar komen, zie Figuur G-8 voor de eerste resultaten. Het model berekent een dieptegemiddelde tijdsafhankelijke weergave van de stroming waarin grootschalige wervelstructuren van de menglaag opgelost kunnen worden. De effecten van mogelijke verticale waterbeweging kunnen dus niet weergegeven worden. Op dit moment is niet duidelijk hoe sterk deze effecten zijn en hoe de menglaag met bijbehorende uitwisseling erdoor beïnvloed wordt. Een nauwkeurige vergelijking tussen metingen en berekeningen vindt binnenkort plaats.



Figuur G-8 Bodemligging (boven) en diepte-gemiddelde snelheid in rivier en haven

## G.6 Aanbeveling vervolgonderzoek

In het onderhavige onderzoek wordt gekeken naar de invloed van een palenscherm op havenuitwisseling. Modelvalidatie vindt plaats op het stromingbeeld in de haven. Het gevalideerde model moet vervolgens gebruikt gaan worden voor havenaanpassingen op prototype-schaal. Het is de verwachting dat uit de analyses van Castillo Rodriguez een redelijk beeld naar voren zal komen over de werking van de palenrij. Er zullen zeker vragen onbeantwoord blijven met name omtrent de palenrij en de menglaag.

Twee aspecten van de modellering vragen hier extra aandacht:

- 3D-structuren, en met name verticale circulaties (opwelling en downwelling) langs de verbindingslijn tussen de havenhoofden
- details van de turbulentie zoals die gegenereerd wordt rondom de palenrij en de meest geschikte implementatie voor het correcte weergeven ervan in de numerieke simulatie

Voor beide aspecten is een wat verdergaande analyse van de metingen gewenst. Het valt te overwegen een aantal principeproeven (zowel numeriek als fysisch) uit te voeren waarbij de genoemde effecten geïsoleerd kunnen worden onderzocht.

*Betrokkenen bij het schaalmodelonderzoek vanuit TU-Delft:*

- Jessica Castillo Rodriguez (afstudeerster)
- Wim Uijttewaal (projectverantwoordelijke en dagelijks begeleider van Mw. Rodriguez)
- Bram van Prooijen (adviseur en ondersteuning FinLab simulaties)
- Huib de Vriend (in de functie van afstudeerhoogleraar van Mw. Rodriguez)