

Een verdieping in de Maasgeul

Onderzoek naar (kosten)optimalisatie van het
onderhoud aan de vaargeul naar Rotterdam



Rijkswaterstaat - Directie Noordzee



Universiteit Twente
de ondernemende universiteit



Een verdieping in de Maasgeul

Onderzoek naar (kosten)optimalisatie van het
onderhoud aan de vaargeul naar Rotterdam

Alfred Schuphof
S9701001

7 september 2005

Afstudeerrapport van Alfred Schuphof

In opdracht van:



Universiteit Twente
de onderzame universiteit

Universiteit Twente
Civiele Techniek & Management
Waterhuishouding en Milieu

Afstudeercommissie

Prof. Dr. A. van der Veen (Universiteit Twente)
Dr. Ir. D.C.M. Augustijn (Universiteit Twente)
Dr. Ir. M.A.F. Knaapen (Universiteit Twente)
Ir. H. Keyser (Rijkswaterstaat)

Opdrachtgever



Rijkswaterstaat - Directie Noordzee

Rijkswaterstaat Directie Noordzee

Woord vooraf

In dit rapport vindt u de resultaten van mijn afstudeeronderzoek ter afronding van de opleiding Civiele Technologie en Management afdeling waterbeheer aan de Universiteit Twente. Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat Directie Noordzee.

Aanleiding van dit onderzoek is dat de prijs van het baggeren de laatste jaren sterk is gedaald. Door deze daling van de baggerprijs kost het meten van de diepte relatief veel. Bij Rijkswaterstaat is daarom de vraag ontstaan of de processen van baggeren en loden niet op een goedkopere manier op elkaar konden worden afgestemd. In dit onderzoek zijn alternatieve onderhoudsstrategieën doorgerekend. Daarvoor is een model opgesteld waarmee verschillende onderhoudsstrategieën zijn gesimuleerd.

Gedurende mijn onderzoek heb ik veel geleerd. Uiteraard heb ik veel over het onderhoud aan de Euro-/Maasgeul geleerd, maar ook over het zelfstandig opzetten, uitvoeren en rapporteren van een onderzoek. Tijdens mijn periode bij Rijkswaterstaat heb ik ervaren hoe het is om te werken bij de overheid. Dit verslag is dan ook maar een deel van wat ik heb geleerd van mijn afstudeeronderzoek.

Graag wil ik nog enkele mensen bedanken voor hun bijdrage aan dit afstudeerrapport. Allereerst wil ik mijn begeleiders bedanken voor hun commentaar en aanwijzingen die zij mij hebben gegeven tijdens mijn onderzoek. Speciale dank gaat daarbij uit naar dhr. Keyser voor zijn begeleiding in de periode dat ik mijn onderzoek bij Rijkswaterstaat heb uitgevoerd. In deze periode heb ik bij 'de Pootjes' gewoond. Door de week was ik weg van vriendin en vrienden, maar toch kreeg ik een soort 'thuis' gevoel. Bedankt voor het fijne verblijf.

Ook wil ik al mijn vrienden en kennissen bedanken voor de fijne studietijd waar ik uitgebreid van heb mogen genieten. Een speciale dank gaat uit naar mijn ouders die het mede mogelijk hebben gemaakt dat ik van mijn studietijd heb kunnen genieten. Ondanks de grote vertraging in mijn studie hebben ze mij altijd gesteund waar ik hen heel erg dankbaar voor ben. Tot slot wil ik Vanessa Veenstra bedanken voor alle liefde en steun die ze mij de afgelopen jaren heeft gegeven.

Samenvatting

De haven van Rotterdam behoort tot de grootste havens in de wereld. Om de haven toegankelijk te maken voor grote schepen is er een vaarweg in de Noordzee aangelegd. Dit is de Euro-/Maasgeul. Rijkswaterstaat (RWS) is verantwoordelijk voor de diepgang van deze vaargeul en het onderhouden daarvan. Om de diepte in de geul te kunnen blijven garanderen voert RWS regelmatig lodingen (metingen) uit om de diepgang te controleren. Als het nodig is wordt er gebaggerd om de geul weer op voldoende diepte te brengen. De laatste jaren is de prijs van het baggeren sterk gedaald, waardoor het controleren relatief veel geld kost. RWS wil daarom onderzoeken of het loden en baggeren van de vaargeul anders op elkaar afgestemd kunnen worden waardoor het onderhoud goedkoper wordt. In dit onderzoek wordt gekeken naar mogelijke alternatieve onderhoudsscenario's. Als onderzoeksgebied is gekozen voor de eerste kilometer van de Maasgeul omdat hier de meeste informatie over beschikbaar was.

Er is begonnen met een analyse van de situatie en het huidige onderhoud. Aan de hand van de literatuur over het onderhoud van civiele werken is het onderhoud aan de vaargeul geclassificeerd als preventief onderhoud. Daarbij wordt het loden in het huidige onderhoud periodiek uitgevoerd. Het baggeren wordt gedaan aan de hand van de data van de lodingen, en is daarmee toestandsafhankelijk onderhoud. In dit onderzoek worden alternatieve scenario's vergeleken, waarbij het loden en het baggeren zowel periodiek als toestandsafhankelijk worden uitgevoerd.

Om de verschillende onderhoudsscenario's te vergelijken is een model opgezet waarmee het onderhoud over een langere periode kan worden gesimuleerd. In het model wordt de bodemhoogte voorspeld met behulp van de verwachte sedimentatie. De sedimentatiesnelheid is bepaald aan de hand van loding- en baggerdata uit het verleden. Voor een periode van vijf jaar simuleert het model het bodemverloop en het benodigde onderhoud bij de verschillende strategieën. De uitkomsten van de simulaties leveren de gemiddelde onderhoudskosten per week, het aantal loding- en baggeringrepen, hoe groot de baggeringrepen zijn geweest en wat de maximaal opgetreden kans op een overschrijding van de kritische bodemhoogte is geweest.

In het model wordt naast een verwachte bodemhoogte ook een werkelijke bodemhoogte gesimuleerd. De werkelijke bodemhoogte wordt gesimuleerd door de parameter voor de sedimentatiesnelheid iedere simulatiestap willekeurig uit een normale verdeling rond de verwachting te nemen. Door simulatie van de werkelijke bodemhoogte kan na een loding de verwachting bijgesteld worden. Doordat het werkelijke bodemverloop bij iedere simulatie verschilt zijn ook de uitkomsten van iedere simulatie anders. Om een gemiddelde uitkomst te krijgen worden alle scenario's twintig keer gesimuleerd.

De gemiddelde onderhoudskosten per week van de verschillende scenario's liggen dicht bij elkaar. De resultaten zijn erg afhankelijk van het verloop van de werkelijke bodemhoogte. De uitkomsten uit de simulaties hebben daardoor een grote marge. Hierdoor is het niet goed mogelijk om alleen op basis van de kosten een goede

onderhoudsstrategie te bepalen. Daarom wordt er ook gekeken naar de grootte en hoeveelheid van de ingrepen gedurende het onderhoud.

In het onderzoeksgebied vindt veel sedimentatie plaats. Van alle baggerwerkzaamheden in de eerste vijf kilometer van de Maasgeul vindt negentig procent plaats in de eerste kilometer. De kosten voor het baggeren zijn in de eerste kilometer daardoor erg hoog en domineren de totale onderhoudskosten voor de eerste kilometer. In het overige deel van de Maasgeul hoeft minder gebaggerd te worden. De kosten van het loden spelen daar een grote rol. Voor een besparing in het onderhoud voor een groot deel van de geul te realiseren zal de lodingfrequentie verlaagd moeten worden.

Het bodemverloop in de geul kan nog niet nauwkeurig genoeg beschreven worden om het mogelijk te maken om geheel toestandsafhankelijk onderhoud te plegen. Geheel periodiek onderhoud biedt daarnaast geen goed alternatief voor het huidige onderhoud. Om de overschrijdingskans te beperken moeten meer ingrepen plaats vinden dan noodzakelijk. Het huidige onderhoud, waarbij het loden periodiek wordt uitgevoerd en het baggeren toestandsafhankelijk, blijkt het meest geschikte scenario te zijn. De lodingfrequentie zal binnen het huidige onderhoud echter wel verlaagd moeten worden. Door het vergroten van de baggermarge is het mogelijk om minder te loden zonder dat de kans op overschrijding van de kritische bodemhoogte stijgt. De sedimentatie neemt toe door het vergroten van de baggermarge. Er zal daardoor meer gebaggerd moeten worden.

In het onderzoek is de baggerprijs constant voor alle scenario's. Constant baggeren met een kleine baggercapaciteit kost hierdoor evenveel als dezelfde hoeveelheid sediment met één grote baggeringreep verwijderen. Hoe de prijsverschillen doorwerken op de verschillende scenario's is moeilijk te voorspellen. Een betere beschrijving van de sedimentatie en de loding en baggerprocessen kan de onzekerheden in het model verlagen. Voor een verdere modellering van het vaargeulonderhoud is het van belang om de juiste ruimtelijke eenheid te kiezen. Het onderzoeksgebied dient representatief te zijn voor het gebied waarop de onderhoudsstrategie van toepassing is.

Begrippenlijst

Loden	Het meten van de diepte in de vaargeul.
Baggeren	Het verwijderen van sediment waardoor de vaargeul dieper wordt.
Tijpoort	Periode van het getijde waarbinnen een schip veilig gebruik kan maken van de vaargeul.
Nautisch Gegarandeerde Diepte (N.G.D.)	De gegarandeerde bovenmaat van de nautisch noodzakelijk berekende diepte. Ook wel streefdiepte genoemd.
Streefdiepte	Zie nautisch gegarandeerde diepte.
Bodem	ligging van de bodem waar de dichtheid $1,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ bedraagt.
Baggermarge	Marge onder de N.G.D. om bodemvariaties en lodings- c.q. baggeronnauwkeurigheden op te kunnen vangen teneinde de streefdiepte te kunnen garanderen.
Overdiepte	De marge tussen de N.G.D. en de actuele bodem
Aanlegdiepte	Diepte tot waar gebaggerd wordt
ondiepte	Indien door een aanzanding/aanslibbing of een obstakel de actuele bodem hoger komt dan de N.G.D.
LLWS	Laag Laag Water springtij (laagste waterstand in een getijdencyclus).
Interventieniveau	Diepte waarop een baggeractie ingepland wordt indien de actuele bodem deze hoogte bereikt.
Middenstandsvlak	Gemiddeld zeeniveau.
Stremmingspercentage	Het percentage schepen dat niet direct naar de haven kan varen, maar tenminste één getijde periode moet wachten.
M ³ Beun Uur	Uurprijs die betaald wordt voor de inzet van een schip. De M ³ Beun Uur is afhankelijk van de grote van de beun en het schip dat het werk uitvoert
Interventiediepte	Diepte waarop besloten wordt in te grijpen
Sleephopperzuiger	Een type baggerschip
TDS	Tonnage Droge Stof, het droge gewicht van het gebaggerde sediment.
Beun	Inhoud van het ruim van een baggerschip
Echolood	Dieptemeter die werkt met teruggekaatste geluidsgolven
Raai	Denkbeeldige richtingslijn over de vaargeul

Inhoudsopgave

WOORD VOORAF	II
SAMENVATTING	III
BEGRIPPENLIJST	V
INHOUDSOPGAVE.....	VI
1 INLEIDING.....	1
2 SITUATIEBESCHRIJVING	3
2.1 OVERZICHT VAN DE VERSCHILLENDE DIEPTEN.....	3
2.2 DIMENSIES VAN DE VAARGEUL	4
2.3 TOELATINGSREGELING.....	6
3 HET HUIDIGE ONDERHOUD	7
3.1 BAGGEREN.....	7
3.1.1 <i>Wanneer</i>	7
3.1.2 <i>Methode</i>	7
3.1.3 <i>Hoeveelheid</i>	7
3.1.4 <i>Nauwkeurigheid</i>	7
3.1.5 <i>Kosten</i>	8
3.2 LODEN	9
3.2.1 <i>Wanneer</i>	9
3.2.2 <i>Methode</i>	9
3.2.3 <i>Nauwkeurigheid</i>	11
3.2.4 <i>Kosten</i>	11
3.3 CONCLUSIE	12
4 THEORIE ONDERHOUD CIVIELE WERKEN	13
4.1 METHODEN VOOR TYPEBEPALING	13
4.2 ONDERHOUDSVORMEN	14
4.2.1 <i>Preventief onderhoud</i>	15
4.2.2 <i>Modelleren van onderhoud</i>	16
4.3 KOSTENOPTIMALISATIE ONDERHOUDSTRATEGIEËN	17
4.3.1 <i>Kostencriteria</i>	18
4.3.2 <i>Gemiddelde kosten per tijdseenheid</i>	19
4.3.3 <i>Gedisconteerde kosten over een oneindige tijdshorizon</i>	19
4.3.4 <i>Equivalente gemiddelde kosten per tijdseenheid</i>	20
4.3.5 <i>Initiële investeringskosten</i>	20
4.4 CONCLUSIE	21



5	MODELLERING	22
5.1	INLEIDING	22
5.2	SOORTEN SCENARIO'S.....	22
5.2.1	<i>Scenario 1: Baggeren en loden beide periodiek</i>	23
	<i>Scenario 2: Periodiek loden en toestandsafhankelijk baggeren</i>	24
5.2.2	<i>Scenario 3: Periodiek baggeren en toestandsafhankelijk loden</i>	25
5.2.3	<i>Scenario 4: Baggeren en loden beide toestandsafhankelijk</i>	26
5.3	KOSTEN	27
5.4	BESCHRIJVING VAN DE PROCESSEN	27
5.4.1	<i>Bodemvoorspelling</i>	28
5.4.2	<i>Onzekerheid</i>	29
5.4.3	<i>Werkelijk bodemverloop</i>	30
5.4.4	<i>Modelparameters</i>	31
6	ALTERNATIEVE SCENARIO'S	35
6.1	HET HUIDIG ONDERHOUD, PERIODIEK LODEN EN TOESTANDSAFHANKELIJK BAGGEREN	36
6.2	ALTERNATIEF WAARIN BEIDE BESLISSINGEN TOESTANDSAFHANKELIJK ZIJN	39
6.3	ALTERNATIEF WAARIN BEIDE BESLISSINGEN PERIODIEK ZIJN	44
6.4	CONCLUSIE ALTERNATIEVE SCENARIO'S	46
7	DISCUSSIE	48
8	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	51
8.1	CONCLUSIES	51
8.2	AANBEVELINGEN	51
	LITERATUUR	53

1 Inleiding

De haven van Rotterdam behoort al jaren tot een van de grootste havens ter wereld en van 1962 tot eind 2004 was het zelfs de grootste overslaghaven van de wereld tot het voorbij werd gestreefd door Shanghai [NOS, 2004]. Al voor de 13^e eeuw lag in Rotterdam het accent meer op de vrachtvaart dan op visserij. In de tweede helft van de 16^e eeuw werd Rotterdam uitgebouwd tot een moderne haven. Later ging de vaarweg naar open zee echter moeilijkheden opleveren. De schepen werden steeds groter en de verzandingen in het mondingsgebied van de Maas en de Rijn werden steeds ernstiger. Er werden veel plannen gemaakt om de weg naar zee voor Rotterdam te verbeteren. Ingenieur P. Caland ontwikkelde in 1863 een plan voor een nieuwe vrije uitweg naar zee die gegraven moest worden dwars door de ‘Steer Sands’ bij Hoek van Holland heen. In feite een reconstructie van een vroegere vaargeul, het Noordergat. Zijn plan werd aangenomen en ir. Caland werd daarmee een van de grondleggers van het Rotterdamse succes als haven. Sinds die tijd heeft Rotterdam zijn natuurlijk potentieel uitgebuit door zijn vaarwegen en havenbekkens uit te baggeren om steeds grotere en diepere schepen te kunnen ontvangen. Reeds in 1864 startte men met het graven van een vaargeul zonder sluizen als definitieve monding van de Rijn en Maas in de Noordzee. Om de haven toegankelijk te maken voor grotere schepen zijn in 1969 de havenbekkens en toegangswegen tot die bekkens uitgediept. Sindsdien is de toegangsweg in de loop van de tijd steeds verder verdiept [GBV].

Vanaf 1983 was de maximale diepgang 21,40 meter en in 1985 is de vaargeul (Euro-/Maasgeul genoemd) toegankelijk gemaakt voor schepen met een diepgang van 21,95 meter (72 voet) en twee jaar later (1987) is de geul zelfs toegankelijk gemaakt voor 74 voet schepen met een diepgang van 22,55 meter.

De schepen kunnen bijna niet veel groter meer worden en de bereikbaarheid van Rotterdam is op het gewenste niveau. Daarmee is een fase ingetreden waarbij de nadruk meer is gericht op het onderhouden van de vaargeul en op het optimaliseren van het toelatingsbeleid. De verantwoordelijkheid voor deze taken ligt bij het rijk, in casu Rijkswaterstaat, Directie Noordzee.

De technologische vooruitgang heeft er voor gezorgd dat het meten van de diepte, het zogenaamde loden, steeds nauwkeuriger kan. Dit heeft er voor gezorgd dat er steeds minder gelood hoeft te worden. De marktwerking heeft er voor gezorgd dat het baggeren goedkoper is geworden. Rijkswaterstaat Directie Noordzee (RWS-DN) heeft het idee dat het onderhoud aan de vaargeul naar Rotterdam goedkoper kan door middel van een betere afstemming van het loden en het baggeren.

Het doel van dit onderzoek is het onderhoud aan de vaargeul te optimaliseren. Dit zal gedaan met behulp van een model waarmee het onderhoud kan worden gesimuleerd. Omdat elke vaargeul zijn eigen karakteristieken heeft zal het model zo generiek mogelijk worden opgesteld. Omdat het meeste onderhoud in de 1^e km van de Euro-/Maasgeul plaatsvindt en over dit deel ook de meeste informatie beschikbaar is zal het model worden toegepast op dit deel van de vaargeul.



Met behulp van het model zullen verschillende scenario's voor het vaargeulbeheer aan de Euro-/Maasgeul worden doorgerekend. Hieruit zal een advies worden gegeven met welke onderhoudstrategie besparingen mogelijk zijn.

Het onderzoek is als volgt opgebouwd: In hoofdstuk twee wordt eerst de situatie beschreven door een overzicht van de verschillende diepten en dimensies van de vaargeul. In het hoofdstuk daarna wordt ingegaan op het huidige onderhoud met daarin aandacht voor het baggeren, het loden en de toelatingsregeling. Hier zal door middel van een reflectie bekeken worden wat er mogelijk anders kan in het onderhoud. Vervolgens zal in hoofdstuk vier een stuk theorie over onderhoud van civieltechnische werken worden besproken. Hier zal ook aandacht worden gegeven aan de kostenoptimalisatie van onderhoudsstrategieën. Het vijfde hoofdstuk behandelt de modellering van het onderhoud aan de vaargeul. In dit hoofdstuk wordt aangegeven welke mogelijkheden het model heeft en hoe de processen die een rol spelen in het onderhoud zijn gemodelleerd. Vervolgens worden in hoofdstuk zes de verschillende alternatieve scenario's gepresenteerd en doorgerekend. Enige kantekeningen die geplaatst kunnen worden zullen in hoofdstuk zeven aan de orde komen. Tenslotte zullen in het laatste hoofdstuk de conclusies en aanbevelingen uit dit onderzoek worden gepresenteerd.

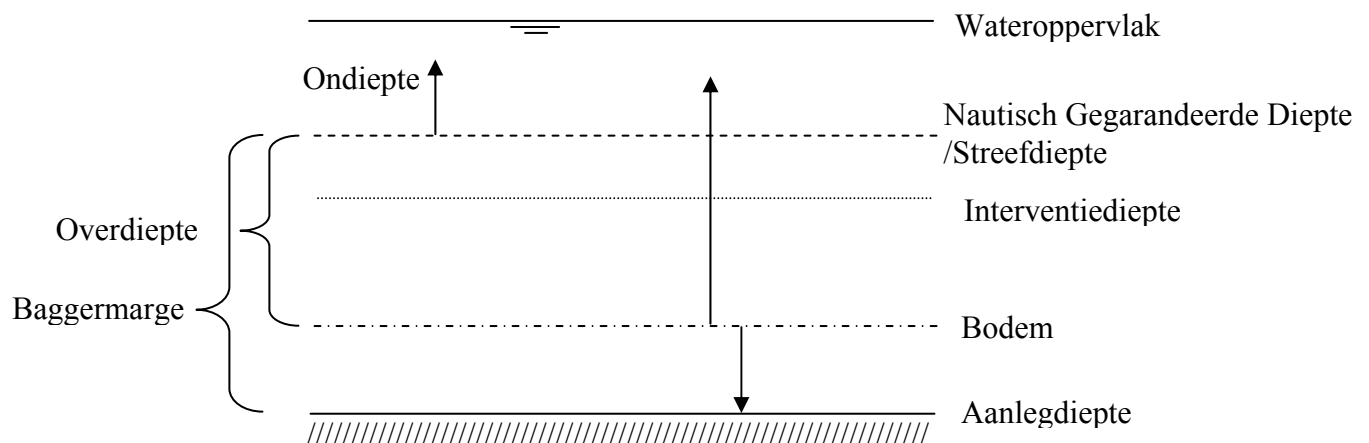
2 Situatiebeschrijving

In dit hoofdstuk zal eerst een introductie worden gegeven over de verschillende diepten die een rol spelen in het onderhoud van een vaargeul, waarna in het volgende hoofdstuk de dimensies van de vaargeul zullen worden gepresenteerd. Aan het eind van dit hoofdstuk wordt kort ingegaan op de toelatingsregeling.

2.1 Overzicht van de verschillende diepten

Om de scheepvaart een veilige doorvaart te kunnen bieden wordt de Euro-/Maasgeul op een nautisch gegarandeerde diepte (n.g.d., ook wel streefdiepte genoemd) gehouden. Als referentiediepte worden twee verschillende niveaus gebruikt. Het middenstandsvlak (MV), dat gelijk is aan het gemiddelde zeeniveau en de laagste laag water springtij (LLWS) dat gelijk is aan de laagste waterstand tijdens de getijdencyclus. In dit onderzoek wordt het middenstandsvlak als referentieniveau gehanteerd.

Om de nautisch gegarandeerde diepte te kunnen blijven garanderen is de aanleg- of onderhoudsdiepte ingevoerd. De aanlegdiepte is het niveau tot waar er wordt gebaggerd. Het verschil tussen de aanlegdiepte en de n.g.d. wordt de baggermarge genoemd. De bodem zal altijd tussen de aanlegdiepte en de n.g.d. liggen. Zodra de bodem boven de n.g.d. komt is er een zogenaamde ondiepte ontstaan en dient er ingegrepen te worden. In de praktijk wordt hier een interventieniveau voor gehanteerd. Dit is een niveau dat onder de streefdiepte ligt en een extra veiligheidsmarge creëert. Er wordt niet ingegrepen zodra de bodem boven de n.g.d. komt maar zodra de bodem boven het interventieniveau komt. Dit interventieniveau is niet strak gedefinieerd en de beslissing om wel/niet te baggeren wordt op basis van ervaring genomen. Het verschil tussen de bodemligging en de n.g.d. wordt de overdiepte genoemd. In figuur 1 zijn de verschillende diepten grafisch weergegeven.



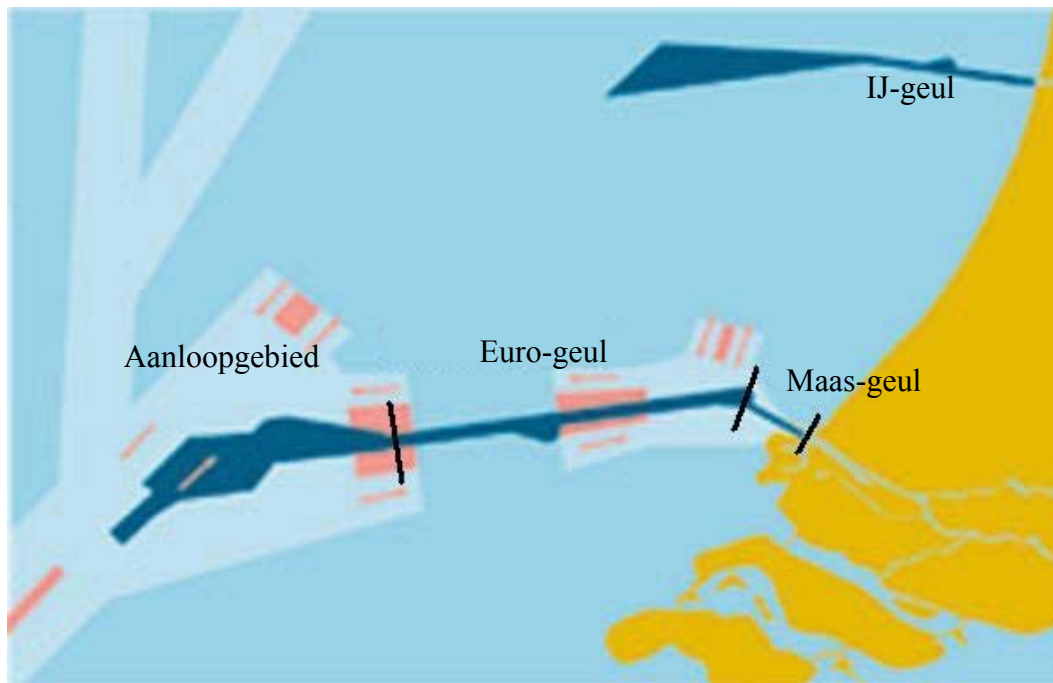
Figuur 1: Overzicht verschillende diepten

In een slibrijk gebied zoals de Maasmond is de bodemligging niet zo duidelijk gedefinieerd als de harde bodem in een zandgebied. De bodemligging wordt dan gedefinieerd als de diepte waarop het slib een dichtheid heeft van $1,2 \text{ ton/m}^3$ [Tubbing, 1988] en [MinVenW_RWS-DN, Augustus 1990].

2.2 Dimensies van de vaargeul

De vaargeul naar Rotterdam bestaat, zoals aangegeven in figuur 2 en bijlage 1, uit verschillende delen. Het eerste deel van de havenmond tot aan de knik wordt de Maasgeul genoemd en daarna gaat hij over in de Eurogeul.

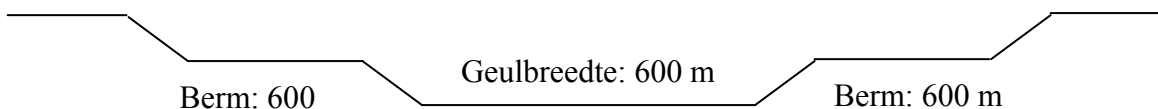
De Eurogeul is 45,65 km lang en 600 meter breed. De Maasgeul is 11,35 km lang en is 600 meter breed aan de kant van de Eurogeul en loopt toe tot 500 meter aan de Maasmond. De totale lengte van de Euro-/Maasgeul bedraagt dus 57 km. Een overzicht van waar de Euro-/Maasgeul ligt is te zien in onderstaand figuur. Een meer gedetailleerd overzicht is te zien in bijlage 1.



Figuur 2: De ligging van de Euro-/Maasgeul [RWS, 2005].

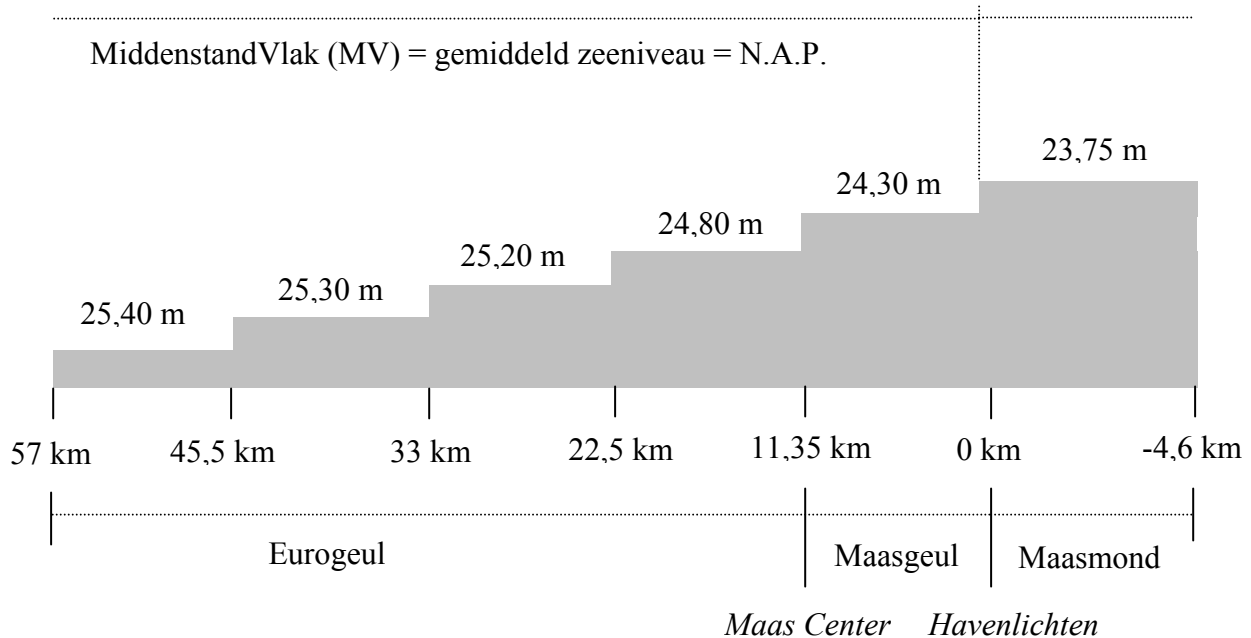
De geul is verdeeld in verschillende vakken. Het onderzoek richt zich op de eerste kilometer van het zogenaamde G-vak. Het G-vak betreft de eerste vijf kilometer van de Maasgeul vanuit de Maasmond. Een overzicht hiervan is gegeven in bijlage 2, overzicht Maasgeul.

Voor de diepte/ligging van de bodem wordt de as van de geul genomen. De Eurogeul heeft aan weerszijden een berm (0,70 m tot 3,30 ondieper dan de geul), zie figuur 3. Schepen met een diepgang tot en met 21,35 meter (70 voet) mogen alleen in bijzondere gevallen, zoals bij het passeren van andere schepen, van de bermen gebruik maken. Schepen dieper stekend dan 70 voet dienen te allen tijde binnen de 600 m brede Eurogeul te blijven. De Maasgeul heeft geen bermen en de breedte ervan neemt af van 600 meter bij de Maas Center Boei tot een breedte van 500 meter bij de havenlichten.



Figuur 3: Dwarsdoorsnede Eurogeul (niet op schaal)

De nautisch gegarandeerde diepte over de as van de euro-/Maasgeul neemt vanaf km 57 stapsgewijs af van -25,4 m tot -23,75m bij de havenlichten/Maasmond. In figuur 4 en tabel 1 wordt het diepteverloop over de lengte van de Euro-/Maasgeul schematisch weergegeven.



Figuur 4: Schematische weergave van de nautisch gegarandeerde diepte langs het lengteprofiel van de Euro-/Maasgeul. Zie ook tabel 1: Nautisch gegarandeerde diepten

Tabel 1: Nautisch gegarandeerde diepten

Traject	Afstand	Nautisch Gegarandeerde Diepte	
		Diepte in meters t.o.v. MV ¹	Diepte in meters t.o.v. LLWS ²
Bermen Eurogeul	57 – 22,5 km	22,80	22,00
Eurogeul	57 – 45,5 km	25,40	24,50
Keerplaats	35 km	25,20	24,40
Eurogeul	45,5 – 33 km	25,30	24,50
Eurogeul	33 – 22,5 km	25,20	24,40
Bermen Eurogeul	22,5 km – K1	22,90/22,80	22,10
Eurogeul	22,5 km – K1	24,80	24,00
Keerplaats	K1	24,00	23,10
Noodankergebied	K1	25,60	24,70
Maasgeul	K1 – 5 km	24,30	23,40
Maasgeul	5 – 0 km	24,30	23,40
Maasmond	0 - -4,6km	23,75	22,85

MV= Middenstands Vlak = Normaal Amsterdams Peil

LLWS= Laag Laag Water Stand = laagste getij in een getijdencyclus

De Bodem van de Eurogeul heeft vanaf 57 km tot 22,5 km een zandgolfkarakter. Verder in oostelijke richting verdwijnt het zandgolfkarakter geleidelijk en wordt de bodem

vrijwel vlak. De bodem van de Maasgeul is vrijwel vlak (geen zandribbels) en heeft, zoals eerder vermeld, geen berm [MinVenW_RWS, Mei 2003].

De gebieden waar de zeebodem en de nautisch gegarandeerde diepte elkaar het dichtst naderen worden de kritieke gebieden genoemd. Voor de Euro-/Maasgeul zijn dit het gedeelte van de Maasgeul van 0 – 6 km (aanslibbing en/of aanzanding) en het Noordhindergebied (zandgolvenproblematiek). Het Noordhindergebied ligt net voor de Eurogeul, zie bijlage 1.

2.3 Toelatingsregeling

Schepen met een diepgang groter dan 17,40 meter maar kleiner dan 20,00 meter zijn geulgebonden, zij zijn verplicht via de Euro-/Maasgeul naar Rotterdam/Europoort te varen. Ongeacht hoog of laag water kunnen deze schepen de toegangsheul veilig bevaren. Schepen met een diepgang van 20,00 meter of meer zijn tijgebonden, dat wil zeggen dat deze schepen van een bepaalde periode van het getij (rond de hoogwaterperiode) gebruik moeten maken om door de Euro-/Maasgeul te varen. De rest van het tij is de vaart dus uitgesloten. Voor tijgebonden scheepvaart geldt een gedifferentieerde toelatingsregeling. Dit wil zeggen dat per schip een tijpoort, een periode waarin een schip de haven binnen kan komen, wordt vastgesteld. Een tijpoort is afhankelijk van de scheepsgrootte (draagvermogen), het scheepstype (ladingsoort) met bijbehorende diepgang en van de verwachte golf- en waterstands-condities tijdens de geulreis. Eveneens wordt de dwarsstroom in het advies betrokken. De tijpoorten worden uitgegeven door het HMR (Hydro-, Meteo- centrum Rijnmond).

Voor de berekening van de tijpoorten wordt voor de diepte van de geul altijd gebruik gemaakt van de n.g.d. De werkelijke bodem ligt echter altijd lager, er is overdiepte aanwezig, en daardoor zou de tijpoort groter kunnen zijn. Er is immers extra diepte waar de schepen gebruik van kunnen maken bij passeren door de geul.

Een geulreis duurt gemiddeld ca. 4 uur. In deze tijd kan op de rede van Hoek van Holland of in de havenmond iets gebeuren, bijvoorbeeld een aanvaring, waardoor een veilige vaart met het schip naar de ligplaats niet meer verantwoord is. Eveneens kunnen de hydro-meteo condities (golven, wind, etc) zodanig verslechterd zijn, dat de loods besluit de reis niet te vervolgen. Hiertoe zijn, direct grenzend aan de geul, een tweetal keerplaatsen en een noodankerplaats aangelegd.

3 Het huidige onderhoud

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op het huidige onderhoud aan de vaargeul. Het onderhoud bestaat in feite uit twee verschillende onderdelen, het baggeren en het loden. Beide ingrepen zullen hieronder worden besproken waarna er een conclusie volgt.

3.1 Baggeren

Het baggeren wordt niet door Rijkswaterstaat zelf gedaan, maar het wordt uitbesteed aan baggermaatschappijen.

3.1.1 Wanneer

De inzet van baggermaterieel wordt gestuurd door middel van verkregen lodingsresultaten. Zodra de bodemligging boven de interventiediepte komt zal er moeten worden gebaggerd. De interventiediepte is niet officieel vastgelegd maar op basis van ervaring wordt er besloten of de bodem te dicht de n.g.d. nadert. In het G-vak wordt, zoals ook blijkt uit bijlage 3, bijna iedere week gebaggerd.

3.1.2 Methode

Er zijn verschillende typen baggerschepen. Het baggeren in de Maasgeul gebeurt met zogenaamde sleephopperzuigers. Een sleephopperzuiger heeft één of twee pijpen met een zuigkop die over de bodem schuift. Daarmee wordt de bovenste laag zand of slib van de bodem opgezogen. De capaciteit van de sleephopperzuigers, de inhoud van de beun, die ingezet worden op het G-vak varieert van 3000m³ tot 8000m³.



Fig. 5: Sleephopperzuiger [RWS, 2005]

3.1.3 Hoeveelheid

De hoeveelheid die per ingreep wordt verwijderd hangt af van de aanwezige ondiepte en van de beschikbare baggercapaciteit. De weg te baggeren hoeveelheid hangt uiteraard af van de werkelijke bodemhoogte en de hoogte tot waarop deze wordt verdiept. Per baggeringreep moet een baggerschip meestal meerdere baggerreizen maken. Soms hoeft een baggerschip niet op en neer te varen maar kan het gebaggerde sediment ter plaatse weer worden gestort. Het sediment wordt dan ter plaatse weer in de waterkolom gebracht waardoor het door de stroming wordt afgevoerd.

3.1.4 Nauwkeurigheid

De nauwkeurigheid van het baggeren hangt af van de gebruikte methode, de omstandigheden en van de gewenste nauwkeurigheid.

Tijdens normale omstandigheden kan er echter vanuit gegaan worden dat het baggerwerk met een nauwkeurigheid van plus of min 20 centimeter uitgevoerd kan worden. Onder erg ongunstige omstandigheden (wind, deining, golven) kan de onzekerheid echter

oplopen tot over een meter. De horizontale nauwkeurigheid is vergelijkbaar met het loden [Woudenberg, 1994].

3.1.5 Kosten

Rijkswaterstaat heeft onderhoudscontracten afgesloten met baggermaatschappijen. Op basis van een inschatting van het jaarlijkse werkpakket, wordt de minimaal benodigde baggercapaciteit bepaald. Deze (basis)capaciteit wordt verkregen door ‘openbare’ aanbesteding en wordt aangewend om een gelijkmatige inzet van de baggercapaciteit gedurende het jaar te bereiken. Deze contracten hebben meestal een duur van twee jaar. In deze contracten wordt een prijs afgesproken voor de te leveren baggerwerkzaamheden.

Het aanzandingspatroon is echter ongelijkmatig over het jaar verdeeld. Dit resulteert in de praktijk, dat in de zomer veelal vooruit gewerkt wordt om aanzandingspieken in de winter te kunnen opvangen. Indien extra capaciteit benodigd is, wordt deze ingehuurd door middel van zogenaamde optie-charter contracten. Dit zijn contracten waarbij van te voren prijzen zijn overeengekomen om materieel in te huren.

Er zijn twee soorten van afrekenen, een prijs per tonnage droge stof (TDS) of per kubieke meter beunuur (M^3 BU). Een M^3 Beun Uur is een uurprijs die betaald wordt voor de inzet van een schip en afhankelijk is van de grote van de beun het schip dat het werk uitvoert. De prijs die in een contract wordt afgesproken is afhankelijk van de locatie waar gebaggerd wordt en van het materiaal dat gebaggerd wordt. Op sommige plaatsen kan er zand gebaggerd worden dat weer op de markt verkocht kan worden en op andere plaatsen dient verontreinigd slib gebaggerd te worden dat afgevoerd dient te worden naar speciale verwerkingsplaatsen. In het ene geval brengt het gebaggerde materiaal dus nog geld op en in het andere geval dient er betaald te worden voor de verwerking ervan.

Binnen deze contracten zijn ook vaak afspraken gemaakt wat er betaald wordt indien er door slecht weer niet gebaggerd kan worden. Soms kunnen schepen niet meer op zee baggeren doordat er een te hoge golfslag is maar is het wel mogelijk om meer richting de havenmond te baggeren omdat daar minder golfslag is. Dit soort werk wordt ook wel ‘Afwaii’ genoemd. Het schip wordt dan op een ander deel van de geul ingezet maar het werk wordt betaald uit een ander contract. Hierdoor is het moeilijk om precies vast te stellen hoeveel het onderhoud van een bepaald deel van de geul kost.

Om de kosten van het baggeren in de 1^e km van de Maasgeul te bepalen wordt gebruik gemaakt van de gegevens uit bijlage 4. Omdat later in het model gewerkt zal worden met een verdieping als gevolg van een baggeringreep zijn de kosten reeds omgerekend naar een prijs centimeter verdieping. Omdat de prijs tot stand is gekomen uit de contracten die per TDS betaald zijn is de prijs ook alleen afhankelijk van het aantal gebaggerde kubieke meters. De kosten van het baggeren zijn bepaald op €6819,- per centimeter verdieping van de eerste kilometer van het G-vak. Hoe deze prijzen zijn berekend wordt uitgelegd in bijlage 5.

3.2 Loden

Het loden wordt niet uitbesteed maar wordt door Rijkswaterstaat zelf uitgevoerd. Rijkswaterstaat heeft daar niet speciaal een eigen schip voor maar het kan één van haar eigen schepen daar voor uitrusten met de benodigde apparatuur.

3.2.1 Wanneer

Het loden gebeurt op vaste tijdsintervallen. Niet ieder deel van de geul wordt even vaak gelood. In de buitengebieden en aan het eind van de Eurogeul wordt nog maar jaarlijks gelood en aan in de havenmond wordt ongeveer iedere 4 weken gelood. Het loden kan echter niet onder alle weersomstandigheden worden gedaan en daarom verschilt het de periode tussen de lodingen. Ook kan er reden zijn om de extra lodingen te verrichten omdat er bijvoorbeeld een storm is geweest die extra sediment heeft getransporteerd.

Uit de gegevens van bijlage 7 blijkt dat de periode tussen twee lodingen in de 1 km van de Maasgeul tussen de 1 en 10 weken ligt.

3.2.2 Methode

Voor het onderhoud zijn de volgende soorten uitvoeringsmethoden van de lodingen van belang:

1. 15 of 30 en 210 Kc (Kilocycle = KHz) lodingen door middel van het single-beam echolood,
2. 95 Kc lodingen door middel van het multi-beam echolood
3. $1,2 \text{ ton/m}^3$ dichtheidsmetingen door middel van dichtheidsprikken
4. $1,2 \text{ ton/m}^3$ dichtheidsmetingen door middel van de navitracker



Fig. 6: Single-beam loding [RWS, 2005]

Ad 1: De 15, 30 en 210 Kc lodingen worden verricht met behulp van het single-beam echolood. Dit is een echolood dat de waterdiepte in de gevaren raaien registreert. De raaien worden loodrecht op de as van de vaargeul gevaren, zodat ook de taluds worden meegenomen in de metingen. De 15 en 30 Kc registreren de diepteligging van de vaste bodem (zandbodem), waarvan de dichtheid ongeveer $1,6 \text{ ton/m}^3$ is. Het verschil tussen de 15 Kc en 30 Kc is dat de 15 Kc nog wat in het zand penetreert. De 210 Kc geeft de dieptelijn aan waar de dichtheid van het slib ongeveer $1,06 \text{ ton/m}^3$ is. Dit is dus alleen van belang in slibrijke gebieden, waar de streefdiepte gekoppeld is aan de $1,2 \text{ ton/m}^3$ -dichtheidslijn. In gebieden waar geen slib aanwezig is registreert de 210 Kc dezelfde dieptelijnen als de 15 Kc en de 30 Kc, omdat daar alleen de overgang aanwezig is van water ($1,0 \text{ ton/m}^3$) naar vaste bodem (ongeveer $1,6 \text{ ton/m}^3$). Wanneer in gebieden waar slib aanwezig is met beide frequenties tegelijkertijd wordt gelood, is het verschil van de dieptelijnen van de 15/30 Kc en de 210 Kc bekend. Dit betekent dat de dikte van de sliblaag ook bekend is.

Ad 2: Inmiddels is er een opvolger van het single-beam echolood, het multi-beam echolood ook wel padloder genoemd. De grootste verschillen met het single-beam echolood zijn:

- Het multi-beam echolood registreert de dieptegegevens over een breedte van ongeveer 4 tot 5 maal de diepte onder de transducer (de zender), in plaats van alleen in de gevaren raai.
- Het multi-beam echolood registreert alleen de diepte van het 95 Kc in plaats van 15/30 Kc en de 210 Kc.
- De raaien worden evenwijdig aan de as van de vaargeul gevaren in plaats van loodrecht op de as.

Het gebruik van het multi-beam echolood betekent dus dat er minder raaien gevaren hoeven te worden om dezelfde hoeveelheid bodeminformatie te krijgen als met het single-beam echolood. Een ander voordeel is, dat er ook meer gegevens over de bodemdiepte ligging bekend zijn. Wanneer er echter lodingen in ondiep water (waterdiepte is kleiner dan 10 meter) plaatsvinden, gaat het voordeel van het multi-beam echolood verloren en kan het efficiënter zijn om met het single-beam echolood te werken. In slibgebieden werkt het multi-beam echolood niet goed, omdat deze alleen de diepte die wordt aangegeven door de 95 Kc registreert, welke in slibgebieden niet nauwkeurig is. Daarom wordt in de Maasmond en op het overige deel van de rivier (het beheersgebied van directie Zuid-Holland), waar over het algemeen veel slib aanwezig is geen gebruik gemaakt van het multi-beam echolood, evenals in de eerste 2 kilometer van de Maasgeul (beheersgebied directie Noordzee). Op deze trajecten en dus ook in het onderzoeksgebied, de 1^e km van de Maasgeul, worden alleen lodingen uitgevoerd met het single-beam echolood.

Ad 3: De 1,2 ton/m³ dichtheidsmetingen worden alleen toegepast in slibgebieden. In zandgebieden is dit nutteloos, omdat de dichtheid van zand 1,6 ton/m³ is en die van water 1.0 ton/m³ en er dus geen geleidelijke overgang is tussen de dichtheden. In slibgebieden is dat wel het geval. Men is tot de 1,2 ton/m³ dichtheidsmetingen overgegaan omdat de nautische diepte voor zeeschepen hierop gebaseerd is.

De dichtheid wordt gemeten met behulp van een radioactieve bron die op het apparaat aanwezig is. De diepte waarop de dichtheid van 1,2 ton/m³ aanwezig is, wordt bepaald met behulp van het single-beam echolood en de op het echolood aanwezige dieptesensor.. De meting is acceptabel zolang het apparaat onder een hoek van 10 in het slib penetreert. De weersgesteldheid speelt een belangrijke rol bij dit meetsysteem, want bij een golfhoogte die groter is dan 0,5 meter kunnen geen nauwkeurige metingen meer worden verricht.

Ad 4: Zoals bij punt al is aangegeven, zijn alle 1,2 ton/m³ dichtheidsmetingen alleen van belang in slibgebieden. Zo ook de dichtheidsmetingen die met de Navi-tracker worden uitgevoerd. De Navi-tracker is een apparaat dat zowel puntmetingen kan verrichten als de dichtheid registreren op een gevaren raai over de breedte van het. De Navi-tracker kan bij slechter weer gebruikt worden dan de dichtheidsprikken. De metingen zijn acceptabel tot een golfhoogte van 0,6 tot 0,8 meter.

De raaien worden evenwijdig aan de as van de vaargeul gevaren. De Navi-tracker kan op verschillende dichtheden worden afgesteld.

In het onderzoeksgebied worden de lodingen dus altijd met behulp van het single-beam echolood gedaan en vervolgens gecorrigeerd aan de hand van de data van de dichtheidsproeven. De dichtheidsproeven worden steekproefsgewijs gedaan waarbij de steekproeven altijd op vaste coördinaten worden uitgevoerd.

3.2.3 Nauwkeurigheid

De onzekerheid of onnauwkeurigheid van een meting is afhankelijk van de gebruikte apparatuur en de omstandigheden. In het onderzoeksgebied wordt de diepte gecontroleerd met behulp van dichtheidsmetingen die steekproefsgewijs worden gedaan. De uitdraaien van de dichtheidsprofielen worden handmatig afgelezen. De dichtheid van de sliblaag is echter niet heel constant waardoor de nauwkeurigheid afneemt.

De lodingen leveren een driedimensionaal beeld van het bodempatroon in de geul. Het op te stellen model zal echter slechts één dimensionaal zijn. Daarom dienen er grote vereenvoudigingen plaats te vinden. Zo wordt er voor de diepte van de geul de gemiddelde diepte van het geulvak aangenomen. Als telkens van het ondiepste punt uitgegaan zou worden dan zouden de te baggeren hoeveelheden niet overeenkomen met de werkelijkheid. Er zou dan vanuit gegaan worden dat het gehele geulvak verdiept dient te worden terwijl dit niet het geval is.

De manier waarop de resultaten worden gepresenteerd zijn ook belangrijk voor het uiteindelijke resultaat. Bij gebruik van kaarten met een grotere grid worden er minder snel ondiepten geconstateerd dan bij gebruik van een kleinere grid. Dit komt omdat er bij de presentatie van de gegevens met de gemiddelde waarde van een grid wordt gewerkt. Dit komt omdat de slibmetingen, de dichtheidsmetingen, meestal puntsgewijs worden uitgevoerd en worden gecombineerd met behulp van een verwerkingsprogramma met de data van het echolood. Doordat de bepaling van het punt waarop de bodem een dichtheid van $1,2 \text{ ton/m}^3$ handmatig wordt afgelezen uit een grafiek is er ook een menselijke fout in de bepaling. Daarom wordt er voor het model gebruik gemaakt van een standaarddeviatie van 10 cm.

3.2.4 Kosten

Evenals de kosten voor het baggeren zijn de kosten voor het loden moeilijk te bepalen per deel van de geul. Dit komt omdat een schip speciaal voor een loding uitgerust moet worden en een hele dag ingehuurd wordt. Daarom wordt een loding altijd voor een groter gedeelte van de geul gedaan. De vaste kosten worden op deze wijze verdeeld over het totale gemeten geulvak. Er is echter toch een poging gedaan om de kosten per gemeten deel van de geul te bepalen. Daarbij is er uitgegaan van een vast bedrag per loding, onafhankelijk van de afstand en een bedrag per gelode afstand van de geul. Een uitgebreide berekening is te vinden in bijlage 8.



3.3 Conclusie

Het loden wordt periodiek uitgevoerd en het baggeren wordt aan de hand van de data van de lodingen uitgevoerd. Het baggeren wordt zogenaamd toestandafhankelijk gedaan. Hierbij wordt de bodem telkens weer tot een afgesproken diepte teruggebracht. Het is echter ook mogelijk om, in plaats van te baggeren nadat er een meting heeft plaatsgevonden, op een structurele basis preventief te baggeren. In dat geval wordt er telkens een vaste hoeveelheid weggebaggerd. Het is onduidelijk welke alternatieven er voor kunnen zorgen dat het onderhoud goedkoper kan. Daarom zal er een model worden opgesteld waarmee verschillende soorten onderhoudscenario's kunnen worden gesimuleerd. Voordat uitgelegd wordt hoe het model werkt zal er in het volgende hoofdstuk eerst enige theorie over het onderhoud van civiele werken worden besproken.

4 Theorie onderhoud civiele werken

Het is gebruikelijk om onderhoud te definiëren als het geheel van activiteiten, waarmee de functionele kwaliteit van een onderdeel (of object) wordt teruggebracht tot het gewenste kwaliteitsniveau. Hierbij zijn inspecties, reparaties, vervangingen en levensduurverlengende maatregelen mogelijke onderhoudsacties [Dekker en Van Noortwijk, 2000]. Er zijn diverse methoden binnen de bedrijfskunde ontwikkeld voor het beheren van onderhoud. Er wordt begonnen met het bespreken van twee methoden die kunnen helpen met het bepalen van het type onderhoud dat het beste toegepast kan worden. Vervolgens zal er een overzicht worden gegeven van verschillende vormen van onderhoud. Tenslotte zal er een overzicht worden gegeven van de methoden die gebruikt kunnen worden om de kosten van het onderhoud te minimaliseren.

4.1 Methoden voor typebepaling

Er zijn in de literatuur twee methoden gevonden die als hulpmiddel gebruikt kunnen worden om te bepalen welk type onderhoud het beste toegepast kan worden. Enerzijds zijn er onderhoudsconcepten ontwikkeld [Gits, 1986], die het onderhoud structureren en een checklist opstellen waaruit naar voren komt welk type onderhoud toegepast zal moeten worden en wanneer dat dient te gebeuren. Het voordeel van deze concepten is dat ze intuïtief en snel duidelijk zijn, het nadeel is echter het ontbreken van een validatie. De onderhoudsconcepten zoals Gits die gebruikt worden samengesteld aan de hand van een ontwerpkader. Dit ontwerpkader bestaat uit een viertal vragen:

- Het analyseren van het gedrag en de structuur van het technische systeem.
- Het bepalen van de elementaire onderhoudsregels, zowel kwalitatief als kwantitatief.
- Het combineren van deze onderhoudsregels
- Het selecteren van het uiteindelijke stelsel onderhoudsregels

Met inachtneming van de beperkte kennis van het faalgedrag, het gebrek aan faaldata en de ontwerpkosten komt de bepaling van onderhoudsconcepten neer op het vinden van een set onderhoudsmaatregelen die op een bevredigende manier aan de ontwerpcriteria voldoen. Het kader om tot een onderhoudsconcept te komen bestaat dan uit de volgende drie elementen.

- Selecteren van geschikte onderhoudsalternatieven
- Het testen van de uiteindelijke set van onderhoudsmaatregelen
- Feedback van informatie

Het gaat er echter vanuit dat er een goede kennis is van het onderliggende fysische faalproces en dat er voldoende data beschikbaar is over het faalgedrag van het systeem.

De onderhoudsconcepten dienen gecontroleerd te worden of ze niet buiten hun geldigheidsgrenzen treden voor het betreffende specifiek te beheren object. Zo dient er volgens Gits toestandsafhankelijk onderhoud gepleegd te worden indien er een toestandsindicator is. Wat onder een toestandsindicator wordt verstaan is echter niet duidelijk gedefinieerd. Hierdoor zouden verschillende onderhoudsstrategieën als uitkomst van het concept kunnen komen afhankelijk van een gekozen toestandsindicator.

Sommige van de vragen in de checklists zoals gebruikt door Gits kunnen wel met kwantitatieve modellen beantwoord worden, hoe specifiek de situatie waarop dergelijke

modellen direct toepasbaar zijn, dan soms ook moge zijn [Dekker en van Noordwijk, 2001].

Anderzijds is er Reliability Centred Maintenance [Smith, 1993]. In deze aanpak wordt het onderhoud afgestemd op de bijdrage aan de bedrijfszekerheid (reliability) van systemen. RCM wordt inmiddels door vele consultants gebruikt en diverse succesvolle toepassingen van RCM zijn bekend. Zo wordt het o.a. bij de meeste vliegtuigmaatschappijen toegepast [Campbell, 1999].

Een analyse via RCM geeft antwoord op de volgende vragen [Alan Pride, 2004]:

- Wat is de functie van het systeem?
- Wat voor functioneel falen is het meest waarschijnlijk?
- Wat zijn de gevolgen van zulk falen?
- Wat kan worden gedaan om de kans op falen te reduceren, het begin van falen te identificeren of om de gevolgen te reduceren?

Het is daarmee een top-down methode en enigszins vergelijkbaar met het concept van Gits. Ook voor RCM gelden vergelijkbare bedenkingen als voor onderhoudsconcepten: keuzes worden voornamelijk gebaseerd op engineering judgement en niet op basis van wetenschappelijke berekeningen [Rausand and Vatn, 1997].

Op de meeste vragen van RCM kan met behulp van de beschrijving van de huidige situatie en het huidige onderhoud al een antwoord gegeven worden. In dit onderzoek staan de onderhoudsmethoden echter al vast. De diepgang dient door baggeren gegarandeerd te blijven. RCM is daarom geen geschikte methode om het onderhoud te optimaliseren. Om dezelfde reden valt het onderhoudsconcept zoals Gits voorstelt ook af. De methode van onderhoud, het baggeren en loden, is een gegeven in dit onderzoek. Het gaat om de soort en de vorm van het onderhoud en de te hanteren strategie daarbinnen.

Er bestaan verschillende vormen van civiel onderhoud. De verschillende vormen zullen eerst worden besproken waarna er dieper wordt ingegaan op één van die vormen, namelijk het preventieve onderhoud. Vervolgens komt vernieuwend onderhoud aan de orde en tenslotte zal wordt er kort ingegaan op het conditieverloop van te onderhouden objecten. Aan het eind van het hoofdstuk staat in de conclusie welke vorm van onderhoud van toepassing is op het vaargeulbeheer.

4.2 Onderhoudsvormen

Globaal zijn er twee typen onderhoud te onderscheiden [Dekker en Van Noordwijk, 2000], namelijk:

- Correctief onderhoud (ná falen).
- Preventief onderhoud (vóór falen).

Hierbij zijn vaak twee manieren van falen te onderscheiden:

- Norm falen, dit treedt op bij het onderschrijden van een van tevoren vastgestelde faal- of veiligheidsnorm (het gebruik kan dan veelal nog wel doorgaan).
- Fysiek falen, dit treedt op bij het bezwijken of daadwerkelijk kapot gaan van een onderdeel (het gebruik moet dan ook stoppen) [Dekker en van Noordwijk, juni 2001]. Fysiek falen treed pas op nadat er eerst norm falen heeft plaatsgevonden.

Civiltechnische objecten kennen voornamelijk de eerste vorm van falen, het norm falen. Dit komt omdat de gevolgen van fysiek falen bij civiltechnische objecten vaak groot zijn. Norm falen van de vaargeul houdt in dat de bodem boven de N.G.D. uitkomt en er een kans is dat er een schip tegen de bodem aanloopt. Zodra dit daadwerkelijk gebeurt is er sprake van fysiek falen van de vaargeul en dit dient te allen tijde voorkomen te worden. Omdat de bodem altijd onder de gegarandeerde nautische diepte moet blijven kan er geen correctief onderhoud plaatsvinden. Hierbij wordt er immers pas ingegrepen zodra de bodem wel boven deze N.G.D. uitkomt. Er zal daarom altijd preventief onderhoud moeten plaatsvinden aan de vaargeul. Hieronder zullen verschillende vormen van preventief onderhoud worden besproken.

4.2.1 Preventief onderhoud

Preventief onderhoud kan worden onderverdeeld in 5 typen onderhoud, namelijk; tijds-, gebruiks-, belastings-, gelegenheds- en toestandsafhankelijk preventief onderhoud. Tijds-, gebruiks- of belastingsafhankelijk preventief onderhoud wordt uitgevoerd na een vaste tijdsperiode, gebruiksduur of belasting. De beslissing om te baggeren wordt echter genomen op basis van de bodemhoogte en is niet afhankelijk van de verstreken tijd en/of het aantal schepen dat is gepasseerd. De eerste drie vormen vallen dus af als type onderhoud voor een vaargeul.

Gelegenhedsafhankelijk preventief onderhoud wordt uitgevoerd op de tijdstippen waarop het onderhoud het best kan worden uitgevoerd, zonder dat er overlast wordt veroorzaakt. Tijdens het baggeren blijft de functie van de vaargeul, de toegankelijkheid van de haven van Rotterdam voor de doorgang van diepgaande schepen, ongehinderd. Er hoeft dus niet gewacht te worden op een bepaald moment, waardoor gelegenhedsafhankelijk onderhoud niet van toepassing is. Soms wordt er echter wel een soort van gelegenheds onderhoud gepleegd doordat er voordelen worden behaald door werk te combineren. Dit kan vergeleken worden met het onderhoud aan wegen. Bij wegenonderhoud zal een weg(deel) afgesloten moeten worden om onderhoud te kunnen plegen. Daarom kan het voordelig zijn om direct meerdere wegdelen te onderhouden. Om te baggeren hoeft de vaargeul niet afgesloten te worden, maar het kost wel relatief veel tijd om naar de baggerplaats te varen. Daarom wordt er soms in een gebied waar de bodem eigenlijk nog niet boven de norm was gekomen alvast gebaggerd omdat er al een schip in de buurt is. Er kan dan beter direct alvast wat worden gebaggerd dan dat het schip niet veel later weer opnieuw naar bijna dezelfde plaats toe moet varen.

Toestandsafhankelijk onderhoud wordt uitgevoerd zodra de toestand van het te beheren object onder de norm verkeert. Hiervoor dienen er regelmatig inspecties uitgevoerd te worden om de toestand van het object te bepalen. Toestandsafhankelijk onderhoud is veelal effectiever en goedkoper dan tijds- of gebruiks afhankelijk onderhoud [Dekker en Van Noortwijk, 2000], afhankelijk van de voorspellende waarde van de toestandsindicator. Een interessant facet bij toestandsafhankelijk onderhoud is de te hanteren inspectiefrequentie. Wanneer het inspectie-interval te groot is kan de toestand van het object tussen de inspecties door al te ver achteruit zijn gegaan terwijl bij een te klein inspectie-interval onnodige inspecties worden uitgevoerd waardoor onnodige kosten worden gemaakt. Op dit moment worden de inspecties aan de vaargeul, de lodingen, periodiek uitgevoerd. Het doel van een inspectie is om meer duidelijkheid te creëren betreffende de toestand waarin de vaargeul zich bevindt. Een loding dient dus eigenlijk pas te geschieden zodra er vraag is naar informatie over de toestand van de bodem. De

informatiebehoefte neemt toe naarmate de onzekerheid in de voorspelling van de bodemhoogte toeneemt. Daarom zou de ladingfrequentie afhankelijk moeten zijn van de onzekerheid in de voorspelling van de bodemhoogte.

In het geval van toestandsafhankelijk preventief onderhoud kunnen zich na inspectie twee mogelijkheden voordoen:

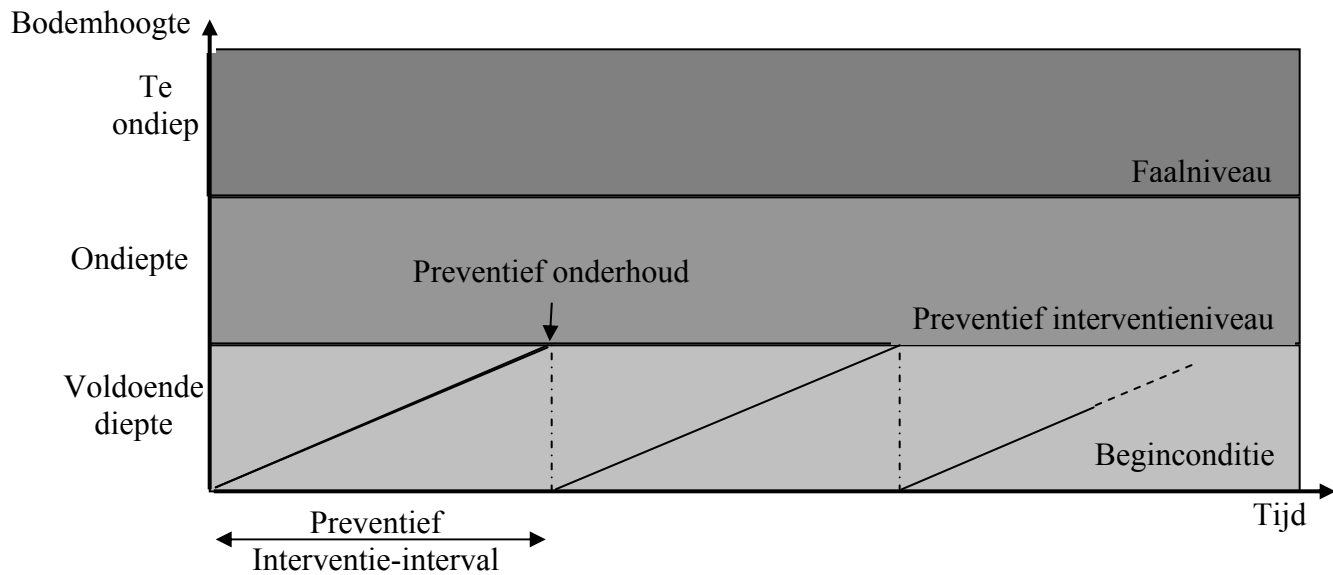
- Er hoeft niets te worden gedaan omdat de conditie het preventieve interventieniveau nog niet heeft overschreden.
- Er moet preventief onderhoud worden uitgevoerd omdat de conditie wel het preventieve interventieniveau, maar nog niet het faalniveau, heeft overschreden.

Preventieve interventieniveaus, -intervallen en/of inspectiefrequenties kunnen worden bepaald door een afweging op basis van risico's of op basis van totale kosten [Dekker en van Noordwijk, 2000]. Omdat de risico's van het falen van de geul niet groter mogen worden zal er in dit onderzoek geoptimaliseerd worden op de kosten. Op welke manieren de kosten kunnen worden geminimaliseerd komt in paragraaf 4.3 aan de orde.

4.2.2 Modelleren van onderhoud

Het onderhoud van een constructie kan meestal worden gemodelleerd als een vernieuwingsproces, waarbij de vernieuwingen kunnen worden gezien als de onderhoudsactiviteiten die de conditie terugbrengen tot het gewenste beginconditieniveau. Statistisch gezien wordt er na elke onderhoudsinterventie dan weer opnieuw begonnen.

Het baggeren is ook een soort vernieuwingsproces waarbij het beginconditieniveau de aanlegdiepte is, zie figuur 7. Bij vervanging van een (onderdeel van een) object staat de beginconditie duidelijk vast. Echter na een baggering staat de aanlegdiepte niet nauwkeurig vast. De onzekerheid over de waarde van de nieuwe aanlegdiepte wordt veroorzaakt door de onzekerheid in de bodemhoogte voor de baggering en doordat het baggeren met een bepaalde grofheid gebeurt. Daarnaast bestaat er onzekerheid over het faaltijdstip. Deze onzekerheid wordt veroorzaakt door de onzekerheid over de waarde van de aanlegdiepte en de onzekerheid over het conditieverloop. Het conditieverloop geeft aan hoe de conditie van een object(onderdeel) in de loop der tijd door veroudering achteruit gaat. [Klatter en van Noordwijk, 1999]. Bij voorspelling van een sedimentatie wordt vaak gebruik gemaakt van een gamma verdeling



Figuur 7: Vernieuwend onderhoud.

4.3 Kostenoptimalisatie onderhoudsstrategieën

Op dit moment gebruikt Rijkswaterstaat de budget trending methode om te bepalen hoeveel geld uitgegeven gaat worden aan onderhoud. Deze methode houdt in dat er op basis van historische gegevens een schatting gemaakt wordt van het budget wat verwacht wordt dat nodig is voor het onderhoud. Men kan dat uitbreiden tot een vergelijkende studie tussen specifieke civieltechnische objecten en zo die objecten identificeren waarbij het minst aan onderhoud wordt uitgegeven. Het probleem is echter dat zulke analyses nooit antwoord geven of en waarom er systematisch teveel wordt uitgegeven. Hoewel in de praktijk de historische situatie vaak gebruikt wordt voor de toekomst, is dat toch een wetenschappelijk onbevredigende situatie. Als gevolg van de budget methode worden de kosten van op dit moment nog zoveel mogelijk jaarlijks gelijk gehouden. Hierdoor is het niet goed mogelijk om het ene jaar te investeren in het onderhoud zodat het onderhoud de jaren erna goedkoper zal zijn. Met de agentschapvorming binnen rijkswaterstaat zal deze vorm van begroten echter grotendeels verdwijnen. Hierdoor ontstaat er meer flexibiliteit, waardoor het gemakkelijker wordt om te investeren in het onderhoud om besparingen in de toekomst te kunnen realiseren.

In dit onderzoek zullen de kosten geminimaliseerd worden. Er zijn vele criteria waarop de kosten kunnen worden geminimaliseerd. Bij het vaargeulonderhoud kan een grootschalige baggeringreep er voor zorgen dat de bodem veel dieper ligt waardoor de marge toeneemt en over een langere periode geen loding nodig is om de bodemhoogte te controleren. Door deze investering nemen de kosten van onderhoud op korte termijn toe, maar de totale kosten op lange termijn dalen.

Bij de vergelijking van onderhoudsstrategieën hebben we dus vaak te maken met kosten die op verschillende tijdstippen worden gemaakt. Er zal dan ook meestal rekening moeten worden gehouden met het feit dat de waarde van één euro over tien jaar kleiner is dan de waarde van één euro vandaag. In dit verband is het gangbaar om de toekomstige kosten om te rekenen naar de zogenaamde contante waarde van deze kosten in het huidige jaar,

met andere woorden, om de toekomstige kosten met behulp van een discontovoet te disconteren naar het huidige jaar. Als discontovoet wordt over het algemeen de reële rentevoet genomen, dat wil zeggen de rentevoet minus de inflatie. Hoe verder in de toekomst bepaalde kosten worden gemaakt, hoe kleiner de bijdrage aan de contante waarde en des te minder tellen ze dus mee in een kostenvergelijking. Bijvoorbeeld de contante waarde van kosten ter grootte van 1 miljoen euro die over 14 jaar worden gemaakt, is bij een discontovoet van 4% [MinVenW, december 2004] gelijk aan 0,5 miljoen euro in het huidige jaar. Het verdisconteren van kosten is van groot belang bij het vergelijken van investeringsbeslissingen in het ontwerp met als doel om een optimale balans te vinden tussen de initiële aanlegkosten enerzijds en de toekomstige onderhoudskosten anderzijds [Dekker en van Noortwijk, juni 2001]. De contante waarde van de verwachte onderhouds- en faalkosten is van belang bij het reserveren en budgetteren van het toekomstige beheer en onderhoud.

Om verschillende onderhoudsstrategieën tegen elkaar te kunnen afwegen en de kosten te minimaliseren zal er een duidelijk kostencriterium moeten zijn. Dit wordt besproken in de volgende paragraaf.

4.3.1 Kostencriteria

Aangezien de geplande levensduur van de meeste waterbouwkundige constructies meestal zeer groot is (>50 jaar), kunnen onderhoudsbeslissingen bij benadering veelal worden vergeleken over een oneindige tijdshorizon. Ook de levensduur van de vaargeul is zeer groot en kan vergeleken worden over een oneindige tijdshorizon. Volgens Wagner [1975] (zoals vermeld in van Noortwijk, 2001) zijn er ruwweg drie typen kostencriteria die gebruikt kunnen worden voor het vergelijken van beslissingen over een oneindige tijdshorizon:

1. De verwachte gemiddelde kosten per tijdseenheid, die worden verkregen door de verwachte kosten te middelen voor een oneindige tijdshorizon;
2. De verwachte gediscoteerde kosten over een oneindige tijdshorizon, die worden verkregen door de verwachte gediscoteerde kosten (de contante waarden van de kosten) te sommeren over een oneindige tijdshorizon;
3. De verwachte equivalente gemiddelde kosten per tijdseenheid, die worden verkregen door de verwachte gediscoteerde kosten over een oneindige tijdshorizon om te rekenen naar de gediscoteerde kosten per tijdseenheid.

Deze kostencriteria kunnen eenvoudig worden berekend indien het onderhoudsproces wordt geformuleerd als een discreet vernieuwingsproces. Een discreet vernieuwingsproces $\{N(n): n = 1,2,3, \dots\}$ is een niet-negatief stochastisch proces, gedefinieerd met betrekking tot discrete tijdseenheden, dat de opeenvolgende vernieuwingen registreert in tijdsinterval $(0,n]$. In dit geval worden de vernieuwingen gerepresenteerd door onderhoudsactiviteiten die het objectonderdeel terugbrengen in zijn “zo-goed-als-nieuw-toestand”. Zij de vernieuwingstijdstippen T_1, T_2, \dots , niet-negatieve, onafhankelijke, identiek-verdeelde, stochastische grootheden met een discrete kansfunctie $P\{T=t\} = p_t$, $t = 1,2,3,\dots$, waarbij p_i de kans op een vernieuwing = baggeringgreep in tijdseenheid i . Verder worden de kosten van een vernieuwing in tijdseenheid t aangeduid met c_t , $t = 1,2,3,\dots$. Bovenstaande drie kostencriteria zullen hieronder nader worden toegelicht.

4.3.2 Gemiddelde kosten per tijdseenheid

De verwachte gemiddelde kosten per tijdseenheid kunnen worden bepaald door de kosten te middelen over een oneindige tijdshorizon. Zij kunnen worden afgeleid van de verwachte kosten over de eindige tijdshorizon $(0, n]$, aangeduid met $E(K(n))$, welke functie de oplossing is van de vergelijking

$$E(K(n)) = \sum_{t=1}^n P_t [c_t + E(K(n-t))] \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad K(0) \equiv 0 \quad (1)$$

Deze vergelijking wordt verkregen door te conditionaliseren op de mogelijke waarden van het eerste vernieuwingstijdstip T_1 en de 'regel van de totale waarschijnlijkheid' toe te passen. Gegeven dat de eerste vernieuwing (*baggeringreep*) plaatsvindt op tijdstip t , met andere woorden gegeven dat $T_1 = t$, zijn de bijbehorende kosten gelijk aan c_t plus de verwachte additionele kosten in het tijdsinterval $(t, n]$, $t = 1, \dots, n$. Met behulp van de discrete vernieuwingsstelling [zie Feller, 1950 en Karlin & Taylor, 1975] kunnen de verwachte gemiddelde kosten per tijdseenheid worden geschreven als:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{E(K(n))}{n} = \frac{\sum_{t=1}^{\infty} c_t p_t}{\sum_{t=1}^{\infty} t p_t} \quad (2)$$

Indien een vernieuwingscyclus is gedefinieerd als de tijdsperiode tussen twee vernieuwingen, dan kan de teller worden herkend als de verwachte cycluskosten en de noemer als de verwachte cyclusbreedte. De hierboven genoemde vergelijking is een bekend resultaat uit de 'renewal reward theory' (Ross, 1970, Hoofdstuk 3). Indien in deze vergelijking geldt dat $c_t = 1$ voor alle $t = 1, 2, 3, \dots$, dan is het verwachte aantal vernieuwingen per tijdseenheid gelijk aan:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{E(N(n))}{n} = \frac{1}{\sum_{t=1}^{\infty} t p_t} \quad (3)$$

Ofwel de reciproque van de verwachte levensduur.

4.3.3 Gediscoteerde kosten over een oneindige tijdshorizon

In wiskundige termen is de contante waarde van de kosten c_n , die in jaar n worden gemaakt, gedefinieerd als $\alpha^n c_n$ met discontofactor $\alpha^t = [1 + (r/100)]^{-t}$ en discontovoet $r\%$, $r > 0$. De verwachte gediscoteerde kosten over een eindige tijdshorizon kunnen met een recursieve formule worden verkregen, die vergelijkbaar is met de formule voor de verwachte niet-gediscoteerde kosten in de eerste vergelijking. In dit geval gaan we uit van de contante waarde van de vernieuwingskosten c_i plus de additionele verwachte gediscoteerde kosten in tijdsinterval $(i, n]$, $i = 1, \dots, n$. De verwachte gediscoteerde kosten over de eindige tijdshorizon $(0, n]$, aangeduid met $E(K_\alpha(n))$, kunnen zodoende worden geschreven als

$$E(K_\alpha(n)) = \sum_{t=1}^n \alpha^t p_t [c_t + E(K_\alpha(n-t))] \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad K_\alpha(0) \equiv 0 \quad (4)$$

met behulp van Feller [1950] kunnen de verwachte gediscoteerde kosten over een oneindige tijdshorizon worden geschreven als

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E(K_\alpha(n)) = \frac{\sum_{t=1}^{\infty} \alpha^t c_t p_t}{1 - \sum_{t=1}^{\infty} \alpha^t p_t} = k(\alpha) \quad (5)$$

Er dient opgemerkt te worden dat bij een gangbare discontovoet van 4% per jaar, de verwachte kosten over een eindige tijdshorizon langer dan vijftig jaar kunnen worden benaderd door de verwachte kosten over een oneindige tijdshorizon.

4.3.4 Equivalente gemiddelde kosten per tijdseenheid

Door het begrip ‘equivalente gemiddelde kosten’ relateren de begrippen ‘gemiddelde kosten’ en ‘gedisconteerde kosten’ aan elkaar. Deze relatie kan worden verkregen door een oneindige reeks van identieke kosten per tijdseenheid te construeren met dezelfde contante waarde als de verwachte gediscoteerde kosten over een oneindige tijdshorizon $k(\alpha)$. Dit kan gemakkelijk worden bewerkstelligd door het definiëren van een oneindige reeks van kosten op de tijdstippen $t = 0, 1, 2, \dots$ die alle gelijk zijn aan $(1-\alpha)k(\alpha)$. Na toepassing van de geometrische reeks geldt dan voor $0 < \alpha < 1$ dat:

$$[1 + \alpha^1 + \alpha^2 + \dots](1-\alpha)k(\alpha) = \sum_{t=0}^{\infty} \alpha^t (1-\alpha)k(\alpha) = k(\alpha) \quad (6)$$

We duiden $(1-\alpha)k(\alpha)$ aan met de verwachte equivalente gemiddelde kosten per tijdseenheid. Met behulp van de regel van L'Hôpital kan worden bewezen dat, als α van de onderkant tot 1 nadert, de verwachte equivalente gemiddelde kosten per tijdseenheid naderen tot de verwachte gemiddelde kosten per tijdseenheid:

$$\lim_{\alpha \uparrow 1} (1-\alpha) \frac{\sum_{t=1}^{\infty} \alpha^t c_t p_t}{1 - \sum_{t=1}^{\infty} \alpha^t p_t} = \frac{\sum_{t=1}^{\infty} c_t p_t}{\sum_{t=1}^{\infty} t p_t} \quad (7)$$

4.3.5 Initiële investeringskosten

Bij het bepalen van kostenoptimale investeringsbeslissingen zijn we geïnteresseerd in het vinden van een optimale balans tussen de initiële investeringskosten en de toekomstige onderhoudskosten. Dit kan een belangrijke rol spelen bij een structurele verandering die van invloed kan zijn op de sedimentatie in de Maasgeul. De aanleg van bijvoorbeeld Maasvlakte 2 of andere objecten die het stromingspatroon in de Maasgeul kunnen veranderen kunnen bijdragen aan het onderhoud van de geul. Doordat de stroomsnelheid wordt vergroot of doordat de sedimentaanvoer wordt verminderd. Voor dit doel moeten de initiële kosten worden opgeteld bij de verwachte toekomstige kosten. Stel dat de investeringskosten in totaal c_0 gulden bedragen. Het financiële verlies berekend over een oneindige tijdshorizon is dan de som van de initiële kosten en de verwachte gediscoteerde toekomstige kosten:

$$L_\alpha = c_0 + \lim_{n \rightarrow \infty} E(K_\alpha(n)) \quad (8)$$

De bijbehorende verwachte equivalente gemiddelde kosten per tijdseenheid zijn $(1-\alpha)L_\alpha$. In dit verband zij opgemerkt dat het criterium van de verwachte gemiddelde kosten per tijdseenheid niet geschikt is voor het bepalen van kostenoptimale investeringsbeslissingen. Dit wordt veroorzaakt doordat de bijdrage van de initiële kosten aan de gemiddelde kosten volledig wordt verwaarloosd [van Noortwijk, 2002]:

$$L = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{c_0 + E(K(n))}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{E(K(n))}{n} \quad (9)$$

Indien in plaats van discrete vernieuwingsprocessen gebruik wordt gemaakt van continue vernieuwingsprocessen kan hetzelfde principe worden toegepast. Fundamenteel dienen dan alleen de sommatietekens vervangen te worden door integralen. De berekeningen moeten dan uitgevoerd worden m.b.v. Laplace transformaties i.p.v. het genereren van functies. Laat $F(t)$ de cumulatieve waarschijnlijkheidsverdeling zijn van de continue vernieuwingstijd $T > 0$ en laat $c(t)$ de kosten zijn die horen bij vernieuwingstijd t . Gebruikmakende van een eindig vernieuwings argument en toepassing van Laplace transformaties kunnen de verwachte gedisconteerde kosten over een oneindige tijdshorizon worden geschreven als [van Noordwijk, 2001]:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E(K_\alpha(t)) = \frac{\int_0^\infty \alpha^t c(t) dF(t)}{1 - \int_0^\infty \alpha^t dF(t)} \quad (10)$$

4.4 Conclusie

Het onderhoud aan een vaargeul kan gekarakteriseerd worden als preventief toestandsafhankelijk onderhoud waarbij een preventief interventieniveau moet voorkomen dat de bodem boven een gegarandeerde diepte komt. Een complicerende factor bij het modelleren van het onderhoud aan de vaargeul is dat de sedimentatie en dus het faaltijdstip onzeker zijn. In het model dat zal worden opgesteld zal de voorspelling van de sedimentatie gerepresenteerd worden volgens een normale verdeling. Hierdoor wordt ook de verwachte bodemhoogte gemodelleerd en gerepresenteerd volgens een normale verdeling. Voor een korte periode betekent dit dat er dus een kleine kans op erosie is. Deze kans wordt echter steeds kleiner in de tijd. Het baggeren kan verder gemodelleerd worden als een vernieuwingsproces waarbij de aanlegdiepte het beginconditieniveau is. Het aanlegniveau hoeft daarbij niet steeds dezelfde waarde aan te nemen.

Door de onzekerheid in de voorspelling van de bodemhoogte ontstaat er een informatiebehoefte naar de werkelijke toestand van de bodem van de vaargeul. Daarom wordt de lodingfrequentie in het model afhankelijk van de onzekerheid in de voorspelling van de bodemhoogte.

Om de kosten van het onderhoud te minimaliseren voor in één jaar zullen de kosten worden uitgedrukt in de gemiddelde kosten per tijdseenheid. Omdat er geen structurele veranderingen aan het stromingspatroon van de Maasgeul worden bekeken zullen er geen investeringskosten worden meegenomen. Daarom zal er ook geen rekening gehouden worden met het disconteren van kosten. Het onderhoud zal op een structurele basis veranderd dienen te worden en daarbij speelt het disconteren van kosten geen rol.

5 Modelling

5.1 Inleiding

Na de situatiebeschrijving, de bespreking van het huidige onderhoud en de theorie over onderhoud aan civiele werken zal nu besproken worden hoe het onderhoud aan de Maasgeul in dit onderzoek is gemodelleerd.

Met het model kunnen verschillende onderhoud scenario's worden doorgerekend om zo de kosten te bepalen van bepaalde onderhoudsstrategieën. Er zal eerst worden besproken welke mogelijkheden het model heeft. Vervolgens zal besproken worden hoe de kosten worden toegekend. Daarna wordt uitgelegd hoe de processen zijn beschreven in het model en de modelparameters zijn bepaald.

5.2 Soorten scenario's

Zoals beschreven in hoofdstuk 3 wordt in het huidige onderhoud loden periodiek uitgevoerd en het baggeren toestandsafhankelijk. In een andere onderhoudsstrategie is het mogelijk dat het baggeren periodiek wordt uitgevoerd. Zodra er een goede voorspelling van de bodemhoogte gedaan kan worden zal het loden ook toestandsafhankelijk kunnen worden gedaan.

Het model is daarom geschikt gemaakt om zowel periodieke als toestandafhankelijke scenario's te kunnen doorrekenen. Zowel het loden als het baggeren kan periodiek of toestandsafhankelijk worden uitgevoerd. Er zijn vier verschillende scenario's te onderscheiden zoals weergegeven in de tabel hieronder.

Tabel 2: Soorten scenario's

	Scenario			
	1	2	3	4
Baggeren	Periodiek	Periodiek	Toestandsafhankelijk	Toestandsafhankelijk
Loden	Periodiek	Toestandsafhankelijk	Periodiek	Toestandsafhankelijk

Binnen de mogelijkheden periodiek- en toestandsafhankelijk ingrijpen is er nog een keuzemogelijkheid in het model, de baggeroptie. Deze geeft aan hoeveel er gebaggerd gaat worden bij een baggeringreep. Hierbij zijn er twee mogelijkheden:

- Er kan telkens tot eenzelfde niveau worden gebaggerd. De hoeveelheid die wordt gebaggerd is het verschil tussen de huidige bodemhoogte en de aanlegdiepte.
- De te baggeren hoeveelheid is constant. Er wordt telkens eenzelfde hoeveelheid gebaggerd onafhankelijk van de gelode/voorspelde bodemhoogte. In dit geval kan er ook niet gesproken worden van een aanlegdiepte.

Bij periodieke ingrepen wordt de beslissing om in te grijpen bepaald door de frequentie van het loden/baggeren. De frequentie komt tot stand door het ingevoerde aantal gewenste ingrepen in combinatie met de totale simulatietijd.

Bij toestandsafhankelijk onderhoud hangt de beslissing tot loden of baggeren af van de toestandsvariabelen. Zodra de toestandsvariabele een bepaalde waarde overschrijdt zal er

worden ingegrepen. Voor het baggeren is de toestandsvariabele de maatgevende bodemhoogte $Z(t)$. De maatgevende bodemhoogte is de hoogte waaronder, met een betrouwbaarheid van 99%, de verwachte bodemhoogte zeker ligt. Deze maatgevende bodemhoogte wordt bepaald met behulp een eerdere bodemhoogte, een verwachte sedimentatie en een bepaalde onzekerheid die rond de voorspelling zit. De verwachte sedimentatie bepaalt waar de nieuwe verwachte bodemhoogte ligt. De maatgevende bodemhoogte is dan de nieuwe verwachte bodemhoogte plus een extra marge voor de onzekerheid die rond de voorspelling van de bodemhoogte zit. Hoe de sedimentatie wordt voorspeld wordt uitgelegd in paragraaf 5.4.1.

De toestandsvariabele die bepaalt wanneer er gelood moet worden is de onzekerheid (aangeduid met de standaarddeviatie σ) die rond de voorspelling zit. De onzekerheid neemt toe met de voorspelde termijn en door een loding wordt de onzekerheid weer teruggebracht naar de nauwkeurigheid van een loding. Hoe de onzekerheid is opgebouwd wordt uitgelegd in paragraaf 5.4.2.

Omdat de beslissing tot een ingreep afhankelijk is van of de ingreep toestandsafhankelijk of periodiek gebeurt wordt er voor ieder scenario een andere beslisboom doorlopen. Hoe de beslisbomen van de verschillende scenario er uit zien wordt in de volgende paragraaf besproken. Eerst worden de scenario's besproken waarbij er periodiek wordt ingegrepen en vervolgens worden de ingrepen een voor een toestandsafhankelijk gemaakt.

In werkelijkheid zal er aan de hand van de data van een loding altijd bepaald worden of er gebaggerd moet worden of niet. De voorspelde bodemhoogte kan laag zijn, maar na een loding kan blijken dat er toch gebaggerd moet worden. In het model wordt daarom naast een verwachte bodemhoogte ook een 'werkelijke' bodemhoogte gesimuleerd. Na een loding zal de verwachte bodemhoogte worden gecorrigeerd aan de hand van de werkelijke bodemhoogte. Meer uitleg over de simulatie van de werkelijke bodemhoogte staat in paragraaf 5.4.3.

5.2.1 Scenario 1: Baggeren en loden beide periodiek

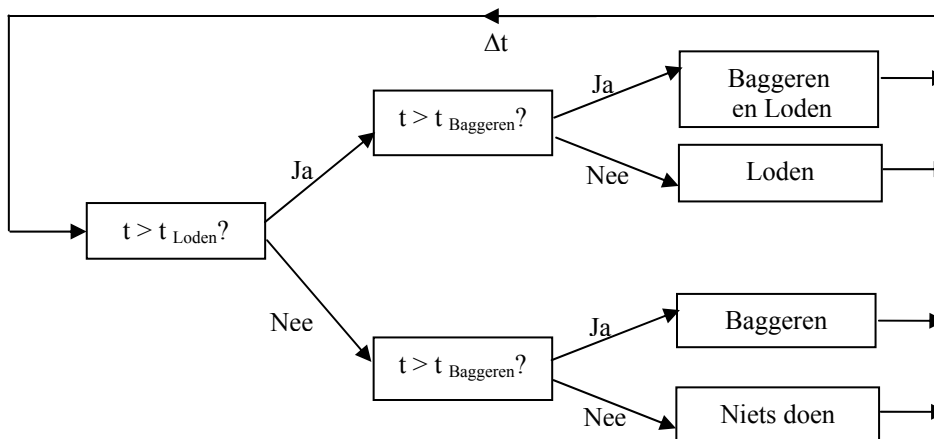


Fig. 8: Beslisboom baggeren en loden beide periodiek

Toelichting:

Beide ingrepen zijn periodiek. Het interval van ingrijpen wordt bepaald door het gekozen aantal baggeringrepen en het gekozen aantal lodingen in de totale simulatietijd. Omdat het totale onderhoud in dit scenario periodiek wordt uitgevoerd, wordt er niet ingegrepen bij te hoge waarden van de maatgevende bodemhoogte en/of de onzekerheid rondom de ligging van de bodem. Als in werkelijkheid na een loding blijkt dat de bodem boven de kritische waarde ligt zal er uiteraard een extra baggeringreep plaatsvinden om de bodem weer onder de kritische waarde te brengen. Omdat de lodingen periodiek plaatsvinden is het mogelijk dat de maatgevende bodemhoogte boven de nautisch gegarandeerde diepte uitkomt en dat er een grote onzekerheid rond de bodemhoogte ontstaat.

Omdat het baggeren periodiek gebeurt dient in dit scenario altijd voor de baggeroptie gekozen te worden waarbij er telkens tot een constant niveau wordt gebaggerd. Als er telkens een constante hoeveelheid wordt gebaggerd en deze hoeveelheid niet overeenkomt met de hoeveelheid sedimentatie dan zal de bodem uiteindelijk omhoog of omlaag bewegen. Bij de baggeroptie waarbij telkens tot hetzelfde niveau wordt gebaggerd is dit niet het geval. Er wordt in die optie niet meer weggehaald dan er ook daadwerkelijk is gesedimenteerd.

Om toestandsafhankelijk te loden zal er een voorspelling van de bodemhoogte gedaan moeten worden. Zodra deze voorspelling niet meer betrouwbaar genoeg is zal er een loding moeten gebeuren. De voorspelling van de bodemhoogte zou dan ook gebruikt kunnen worden voor de beslissing om te baggeren. In het huidige onderhoud gebeurt het baggeren al toestandsafhankelijk. Dit scenario is daardoor onrealistisch en er zal daarom verder geen aandacht worden besteed aan dit scenario. Er zullen met het model geen simulaties met dit scenario worden doorgerekend.

Scenario 2: Periodiek loden en toestandsafhankelijk baggeren

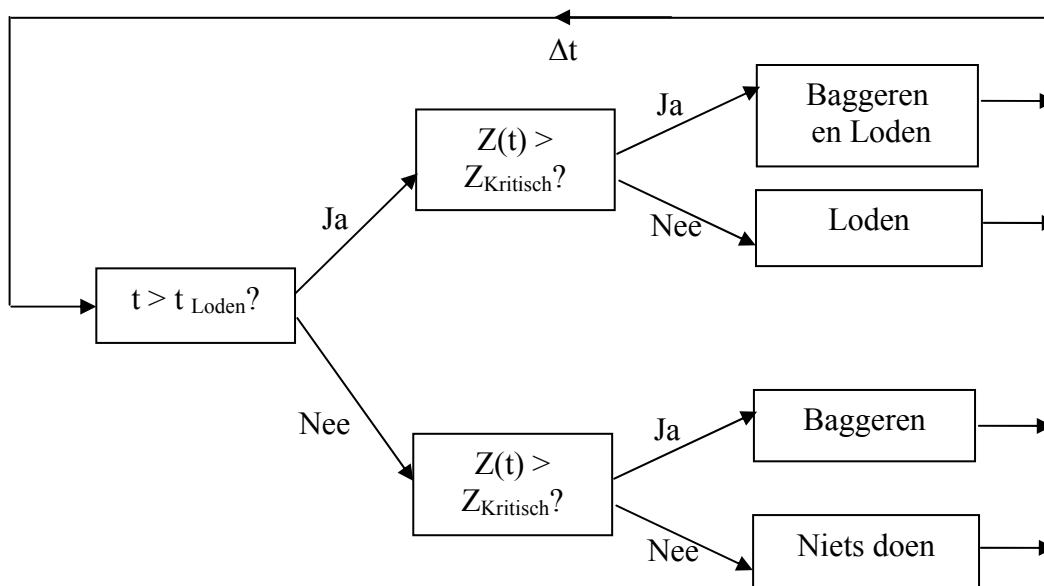


Fig. 9: Beslisboom loden periodiek en baggeren toestandsafhankelijk

Toelichting:

De beslissing om te loden is periodiek en de onzekerheid rond de voorspelling zal dus periodiek worden teruggebracht. De variabele maximale onzekerheid is niet van toepassing bij dit scenario.

De beslissing om te baggeren is toestandsafhankelijk. Zodra de maatgevende bodemhoogte boven de kritische waarde komt zal er dus worden ingegrepen door middel van een baggeringreep. De kritische bodemhoogte is het interventieniveau. Zodra de maatgevende bodemhoogte het interventieniveau overschrijdt zal er worden gebaggerd. Zodra er op hetzelfde tijdstip een loding en een baggeringreep gewenst zijn wordt eerst de baggeringreep uitgevoerd. Dit wordt gedaan omdat een baggeringreep een bepaalde onzekerheid met zich meebrengt die daarna door de loding direct weer wordt weggenomen.

Voordelen van dit scenario

De lodingen worden periodiek uitgevoerd en afhankelijk van de toestand van de bodemhoogte wordt er vervolgens een baggeringreep gepland.

Omdat er automatisch gebaggerd wordt zodra de maatgevende bodemhoogte boven de kritische waarde komt blijft het risico dat de bodem boven de nautisch gegarandeerde diepte komt beperkt.

Nadelen van dit scenario

Indien de lodingfrequentie zeer laag is zal de onzekerheid groot kunnen worden. Hierdoor zal de maatgevende bodemhoogte hoog kunnen komen te liggen en kan er zelfs een situatie ontstaan waarbij na een baggeringreep de maatgevende bodemhoogte boven de kritische waarde blijft doordat de onzekerheid te groot is. In dat geval zal er in het model iedere simulatiestap een baggeringreep uitgevoerd worden totdat er een loding is uitgevoerd en de onzekerheid weer is teruggebracht.

5.2.2 Scenario 3: Periodiek baggeren en toestandsafhankelijk loden

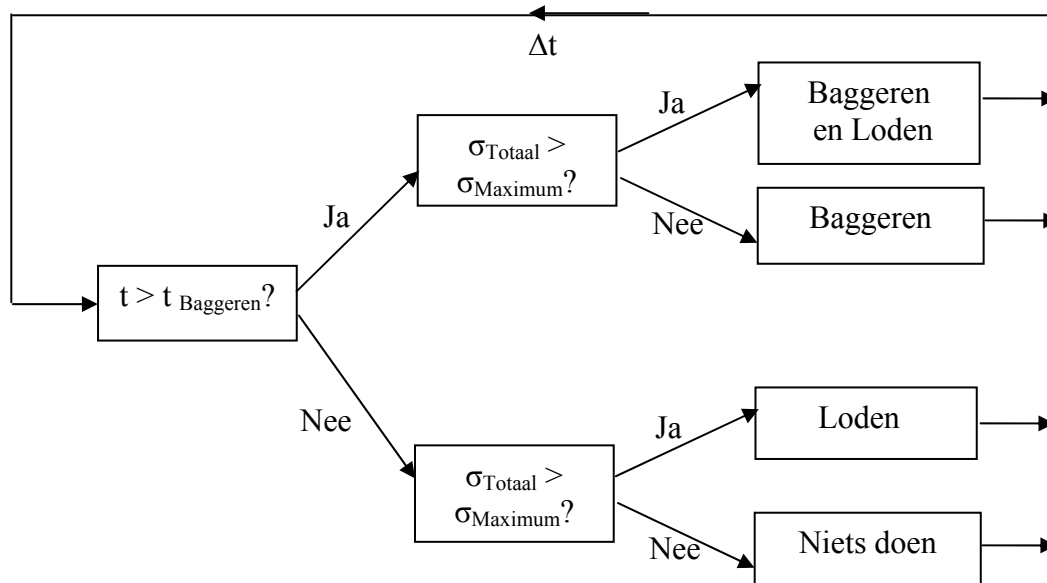


Fig. 10: Beslisboom baggeren periodiek loden toestandsafhankelijk

Toelichting:

De beslissing om te baggeren is periodiek. Net als bij het 1^e scenario kan de maatgevende bodemhoogte daardoor boven de nautisch gegarandeerde diepte uitkomen.

Omdat de beslissing om te loden echter toestandsafhankelijk is zal er gelood worden indien de onzekerheid een bepaalde maximaal acceptabele waarde overschrijdt. Deze maximaal acceptabele waarde is de grootste toegestane onzekerheid rond de voorspelling van de bodemhoogte. Zodra de onzekerheid deze waarde overschrijdt is de marge waarbinnen de bodemhoogte zal liggen te groot. Daarom zal er een loding moeten plaatsvinden om de werkelijke ligging vast te stellen en de onzekerheid rond de ligging van de bodemhoogte dus weer terug te brengen tot de nauwkeurigheid van een loding.

De onzekerheid rond de voorspelling blijft in dit scenario beperkt tot de maximaal acceptabele waarde. Bij een lage maximaal acceptabele waarde zal er vaker gelood moeten worden dan bij een hoge maximaal acceptabele waarde.

Voordelen van dit scenario

Er wordt pas gelood zodra er een bepaalde mate van onzekerheid rond de voorspelling is ontstaan. Pas als er behoefte aan informatie over de bodemhoogte is zal er een loding plaatsvinden. Er wordt niet meer ‘overbodig’ gelood.

Net als in het vorige scenario zijn de voordelen van periodiek baggeren dat het beter is in te plannen.

Nadelen van dit scenario

De maatgevende bodemhoogte kan ook in deze scenario's boven de nautisch gegarandeerde diepte uitkomen.

5.2.3 Scenario 4: Baggeren en loden beide toestandsafhankelijk

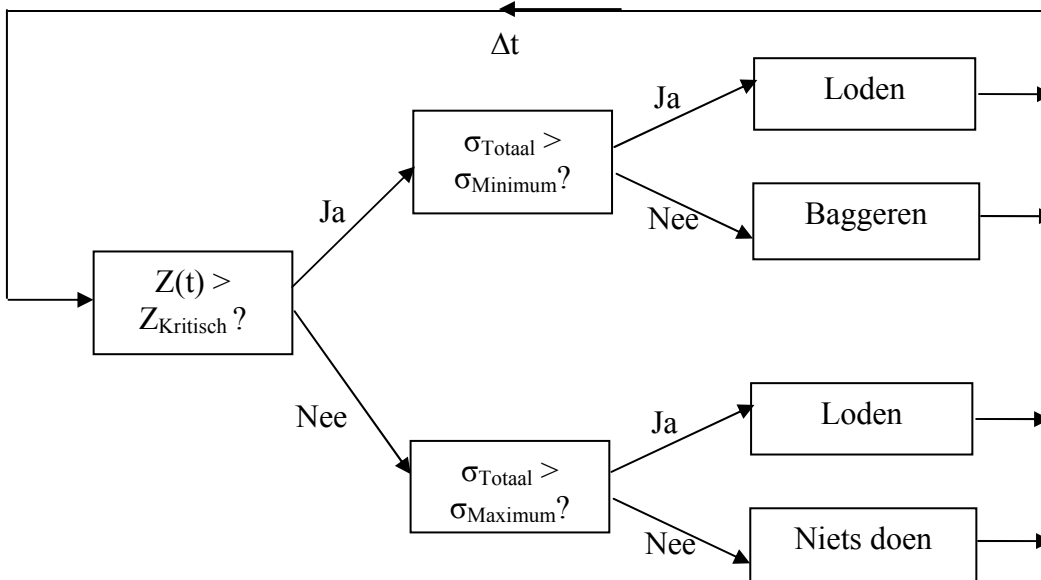


Fig. 11: Beslisboom baggeren en loden beide toestandsafhankelijk

Toelichting:

Beide beslissingen/ingrepen zijn toestandsafhankelijk. Er wordt eerst getoetst of de maatgevende bodemhoogte ($Z(t)$) boven de kritische waarde ($Z_{kritisch}$) komt.

Zodra de maatgevende bodemhoogte boven de kritische waarde komt dient er ingegrepen te worden. Of er gelood of gebaggerd dient te worden hangt af van de onzekerheid rond de bodemhoogte. Indien er een grote onzekerheid is kan er beter eerst gelood worden. Indien uit een loding namelijk blijkt dat de voorspelling te hoog is en de bodem lager ligt dan voorspeld is baggeren nog niet nodig en kan een baggeringreep nog enige tijd uitgesteld worden. Hiervoor dient de onzekerheid wel groot te zijn anders zal de voorspelling niet veel te hoog kunnen uitvallen en de baggeringreep niet lang uitgesteld hoeven te worden. Om te toetsen of de onzekerheid groot genoeg is wordt het toetsingscriterium minimale onzekerheid ingevoerd. Zodra de onzekerheid groter is dan dit minimum kan er beter eerst gelood worden. Als de onzekerheid kleiner is dan dit minimum is de kans dat de bodemhoogte veel te hoog wordt voorspeld erg klein en kan er beter direct gebaggerd worden.

Indien de maatgevende bodemhoogte niet boven de kritische waarde komt wordt er daarna getoetst of de onzekerheid boven de maximaal acceptabele waarde ligt. Als ook dit niet het geval is hoeft er (nog) niet ingrepen te worden. Zodra de onzekerheid boven de maximaal acceptabele waarde is gekomen maar de maatgevende bodemhoogte de kritische waarde niet heeft overschreden, dan dient er gelood te worden.

Voordelen van dit scenario

De bodemhoogte zal niet boven de kritische waarde uitkomen en er zal alleen gelood worden zodra daar behoefte aan is.

Nadelen van dit scenario

Er is vooraf niet bekend hoe vaak en wanneer er gebaggerd en gelood dient te worden. Hierdoor zijn de ingrepen moeilijker te plannen.

5.3 Kosten

De kosten bestaan uit de kosten voor het baggeren en de kosten voor het loden. De opbouw van de prijs voor baggeren en loden is besproken in hoofdstuk 4. Voor het baggeren is een prijs van €6819,- per centimeter verdieping van de eerste kilometer van het G-vak bepaald en voor het loden bedragen de kosten €351,- per kilometer geul die gelood wordt, plus de vaste kosten van €5826,- per dag loden. Dit zijn sterke vereenvoudigingen van de opbouw van de kosten. In werkelijkheid zullen de kosten voor baggeren en kosten veranderen bij een andere onderhoudstrategie. Hoe een verandering in de onderhoudstrategie doorwerkt in de kosten van het baggeren en loden is moeilijk te voorspellen en daarom zullen voor de verschillende scenario's telkens dezelfde prijzen voor baggeren en loden worden aangehouden.

Omdat er per baggeringreep meerdere baggerreizen gemaakt moeten worden hangen de kosten van het baggeren alleen af van de gebaggerde hoeveelheid en niet van het aantal baggeringrepen. Hierdoor maakt het voor de baggerkosten geen verschil of een bepaalde verdieping in één ingreep wordt gerealiseerd of in meerdere keren.

5.4 Beschrijving van de processen

Het belangrijkste proces dat beschreven wordt is de voorspelling van de bodemhoogte. Daarnaast is de onzekerheid die rond deze voorspelling zit een belangrijk proces in het model omdat dit grotendeels het loden bepaalt.

5.4.1 Bodemvoorspelling

De voorspelling van de bodemhoogte wordt gedaan met behulp van een verwachte sedimentatie. Sedimentatie is het bezinken van deeltjes. De snelheid waarmee de deeltjes bezinken hangt onder meer af van de stroomsnelheid van het water. De stroomsnelheid in de 1^e km van de Maasgeul wordt mede bepaald door het getijde. Hierdoor is de sedimentatie op korte termijn zeer wisselend. Gedurende de sterke stroming tijdens opkomend en afgaand tij zal er erosie optreden en tijdens dood tij zal er sedimentatie plaatsvinden. Netto vindt er over een langere termijn sedimentatie plaats.

De aanvoer van sediment wordt voor een groot gedeelte bepaald door de Maas. Het slib wordt meegevoerd vanuit de rivier en bezinkt naarmate monding breder wordt en de stroomsnelheid daalt. Omdat de Maas gevoed wordt door regenwater is de afvoer in de zomer lager dan in de winter en de sedimenttoevoer is daardoor in de winter ook hoger dan in de zomer.

Aangenomen wordt dat de gemiddeld gebaggerde hoeveelheden uit bijlage 3 representatief zijn voor de hoeveelheden sediment in dezelfde periode. Daaruit blijkt dat de sedimentatie over lange termijn varieert.

De spreiding van de sedimentatie in de tijd wordt in het model meegenomen door de onzekerheid rond de voorspelling. Dit wordt verder uitgelegd in paragraaf 5.4.2.

Indien er geen onderhoud wordt gepleegd, zal de bodem steeds verder omhoog komen en de waterdiepte afnemen. Hierdoor zal de stroomsnelheid van het water toenemen waardoor de sedimentatie afneemt. Zodra de waterdiepte te laag wordt en de stroomsnelheid te hoog zal er erosie plaatsvinden. Op een bepaalde diepte zal er een evenwicht ontstaan tussen de sedimentatie en de erosie. Dit is de evenwichtsdiepte. In de figuren 11A en 11B wordt dit grafisch weergegeven.

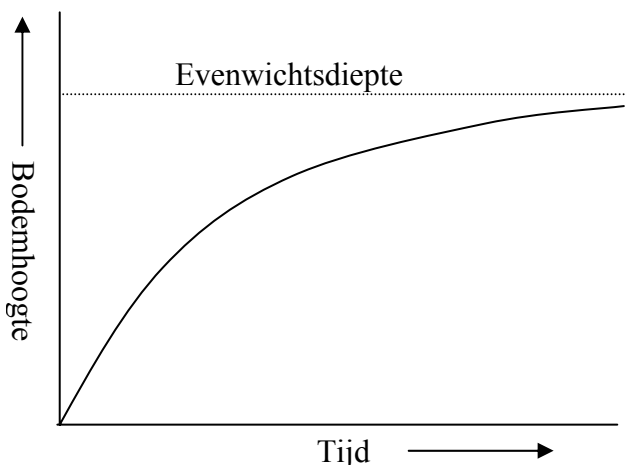


Fig. 12A: Bodemhoogte in de tijd

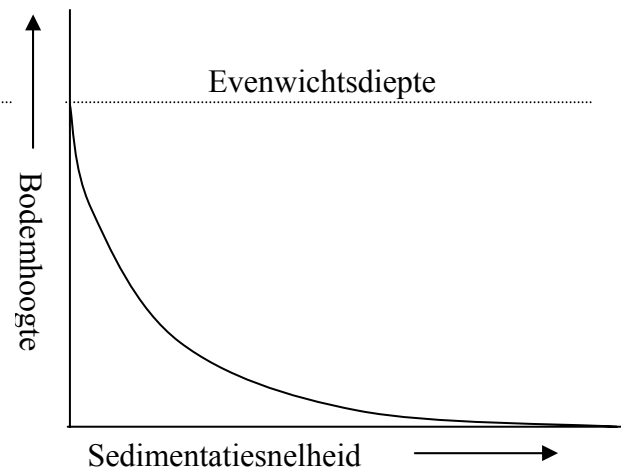


Fig. 12B: Sedimentatiesnelheid tegen de bodemhoogte

In de praktijk vindt er regelmatig onderhoud plaats. De sedimentatiesnelheid zal na een baggeringreep hoger zijn aangezien de bodem lager ligt. De waterdiepte is gestegen waardoor de stroomsnelheid lager ligt.

De verwachte bodemhoogte op tijdstip t wordt voorspeld door onderstaande formule:

$$Z(t) = Z_{\infty} + (Z_{t-1} - Z_{\infty})e^{-A \cdot \Delta t}$$

Hierin is:

Δt = grote van de tijdstap van de simulatie

A = maat voor groeisnelheid van de bodem.

$Z(t)$ = de verwachte bodemhoogte op tijdstip t

Z_{∞} = de evenwichtsdiepte

Z_{t-1} = de verwachte bodemhoogte op tijdstip t - 1

Deze functie zorgt ervoor dat de bodemhoogte naar de evenwichtsdiepte gaat.

De bepaling van de parameters staat in paragraaf 5.4.4.

5.4.2 Onzekerheid

Er wordt vanuit gegaan dat de voorspelling van de sedimentatie zowel te hoog als te laag kan uitvallen en dat de kansen hierop even groot zijn. Daarom wordt er aangenomen dat de voorspelling van de sedimentatie een normale kansverdeling heeft. Doordat de sedimentatievoorspelling normaal verdeeld wordt geacht zal ook de verwachte bodemhoogte een normale kansverdeling hebben. De verwachte bodemhoogte (die toeneemt als gevolg van de sedimentatie) heeft een normale kansverdeling. Het is dus niet zo dat de bodemhoogte zelf een normale verdeling heeft, want dan zou er evenveel kans zijn op een bodemdaling als op een bodemstijging.

De kansdichtheidskromme van de normale verdeling is een klokvormige curve, symmetrisch rondom het gemiddelde μ en gedefinieerd van $x = -\infty$ tot $x = +\infty$. In het model is de verwachte sedimentatie het gemiddelde.

Naast de onzekerheid in de voorspelling van de sedimentatie wordt de onzekerheid rond de verwachte bodemhoogte ook beïnvloed door het baggeren en het loden. Omdat het baggeren niet erg nauwkeurig gebeurt staat het niet nauwkeurig vast hoeveel de bodem omlaag is gebracht.

Een baggeringreep zorgt voor een extra onnauwkeurigheid rond de verwachte bodemhoogte. De onzekerheid rond de verwachte bodemhoogte neemt door een baggeringreep dus toe. Een baggerschip heeft altijd wel een indicatie tot welke hoogte de bodem is verdiept, maar deze indicatie is te onnauwkeurig om als lodingresultaat te kunnen dienen.

Een loding heeft een negatief effect op de onzekerheid, het brengt de onzekerheid omlaag. Na een loding is met een bepaalde nauwkeurigheid de werkelijke bodemligging bekend. De onzekerheid is daardoor teruggebracht tot de nauwkeurigheid van een loding. Dit is de minimale onnauwkeurigheid die altijd rond de bodemligging aanwezig is.

Er wordt aangenomen dat de onzekerheden rond het baggeren en loden ook een normaal verdeelde kansdichtheid bezitten en dat deze onderling onafhankelijk van elkaar zijn.

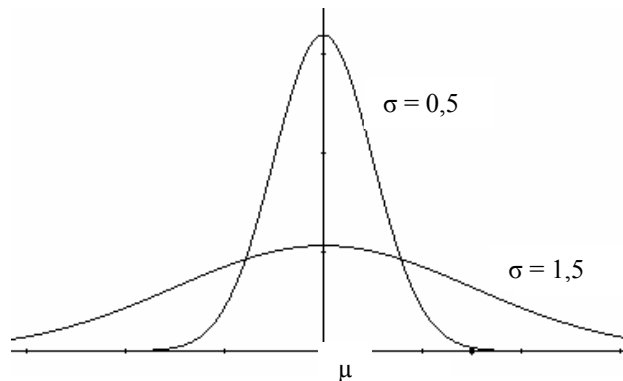


Fig 13: normale kansdichtheidscurve met gemiddelde $\mu=0$ en standaardafwijking $\sigma = 0,5$ en $\sigma = 1,5$

Door deze aannames is het mogelijk om de verschillende onzekerheden op de volgende wijze bij elkaar op te tellen [Poortema, Mei 2000]:

$$\sigma_{Totaal} = \sqrt{\sigma_{lod}^2 + \sigma_{Sed}^2 + \sigma_{bag}^2}$$

Het verloop van de verwachte en de maatgevende bodemhoogte als gevolg van bagger- en lodingrepen ziet er dan uit zoals grafisch is weergegeven in figuur 14.

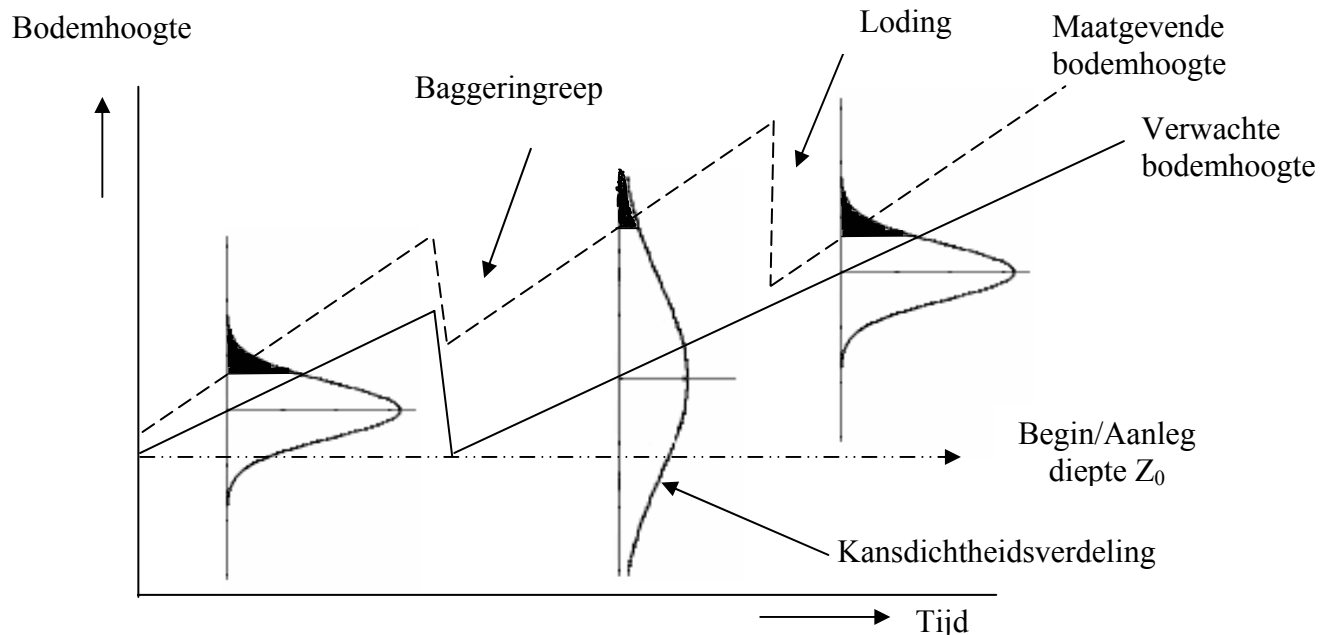


Fig. 14: Verloop van de verwachte- en maatgevende bodemhoogte

De verwachte bodemhoogte neemt toe en wordt alleen door een baggeringreep weer teruggebracht. De maatgevende bodemhoogte neemt sterker toe dan de verwachte bodemhoogte doordat ook de onzekerheid rond de sedimentatievoorspelling toeneemt. Bij een baggeringreep wordt de verwachte bodemhoogte teruggebracht maar doordat de onzekerheid toeneemt, neemt de maatgevende bodemhoogte minder af dan de verwachte bodemhoogte. Na een loding is de onzekerheid weer teruggebracht en is de spreiding rond de voorspelling afgenomen.

5.4.3 Werkelijk bodemverloop

Een loding wordt gedaan om de werkelijke bodemligging te bepalen. Het model voorspelt een verwachte bodemligging. Na een loding zal de verwachte bodemligging bijgesteld worden aan de werkelijke bodemligging. Als alleen de verwachte bodemhoogte gesimuleerd wordt zal een loding altijd de verwachting bevestigen. Door het simuleren van een werkelijk bodemverloop wordt ook in het model de verwachte bodemhoogte bijgesteld. Hierdoor is het mogelijk om de gevolgen van een over-/onderschatting van de sedimentatie te bepalen.

De werkelijke bodemligging wordt nagebootst door bij de berekening van de verwachte sedimentatie telkens de parameter A willekeurig uit een normale verdeling met verwachting 0,045 en standaardafwijking 0,01 te kiezen.

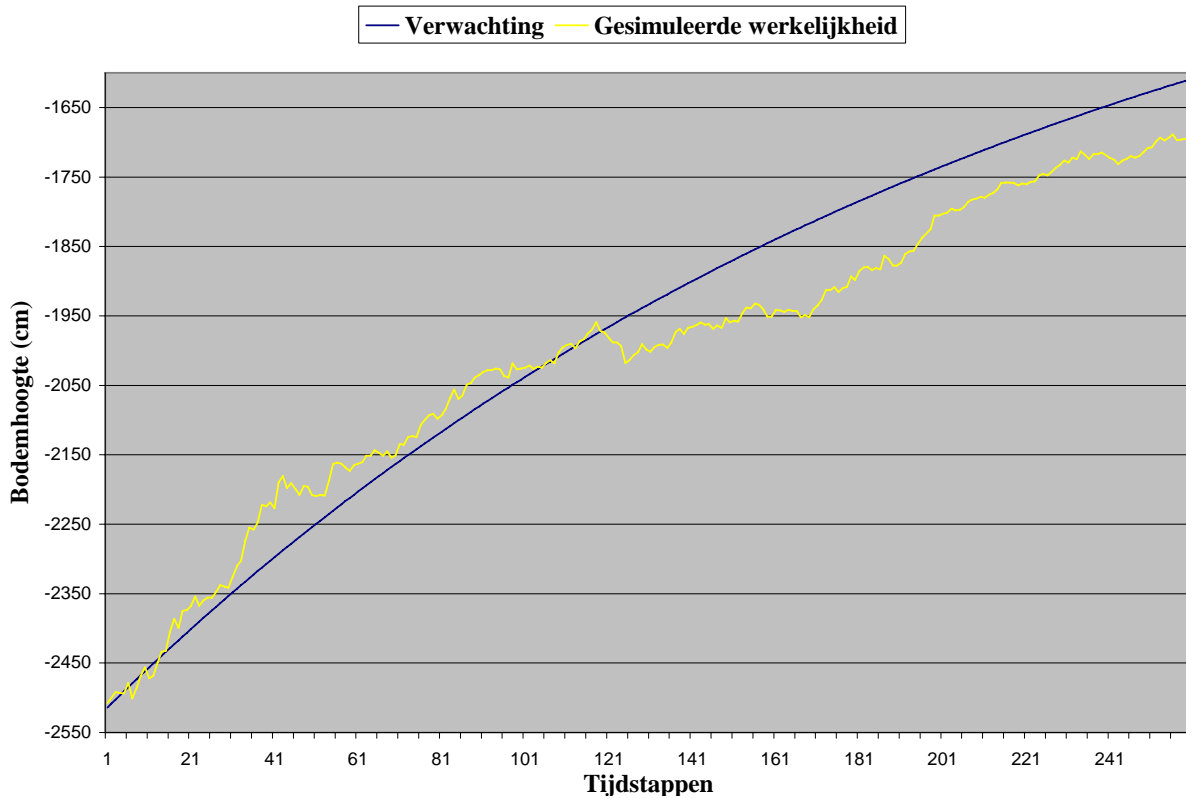


Fig 15: Verwachte bodemverloop en gesimuleerde werkelijkheid

5.4.4 Modelparameters

Als eerst worden de invoerparameters besproken. Sommige van de invoerparameters kunnen ook uitvoerparameters zijn afhankelijk van het gesimuleerde scenario. Deze parameters zullen echter niet nogmaals besproken worden bij de uitvoerparameters. Een overzicht welke parameters invoer en/of uitvoer zijn is weergegeven in tabel 3.

Tabel 3: overzicht invoer-/uitvoer parameters

Parameter \ Scenario	1	2	3	4
T	O	O	O	O
A	O	O	O	O
Af	O	O	O	O
Z(0)	O	O	O	O
Z(∞)	O	O	O	O
σ (loden)	O	O	O	O
σ (baggeren)	O	O	O	O
σ (sedimentatie)	O	O	O	O
Betrouwbaarheid (α)	O	O	O	O
Baggervolume	X	O/X	O/X	O/X
Aantal baggeringrepen	O	O	X	X
Aantal lodingen	O	X	O	X
Maximale onzekerheid	-	-	O	O
Minimale onzekerheid	-	-	-	O
Kostprijs baggeren	O	O	O	O
Gemiddelde onderhoudskosten	X	X	X	X
Kans op overschrijding	X	X	X	X
0 = invoer, X = uitvoer en - = niet van toepassing				

Invoer parameters

De totale simulatietijd T.

Voor de totale simulatietijd wordt een periode van 5 jaar genomen. Deze periode is lang genoeg om te zien wat het effect van de door te rekenen scenario's is. Het model rekent in tijdstappen van een week, om een scenario van 5 jaar door te rekenen wordt de simulatietijd T dus 260.

Parameter A

De parameter A wordt gebruikt voor de sedimentatievoorspelling. Deze parameter is op verschillende wijzen bepaald. Eerst is met behulp van de loding- en baggerdata uit de bijlagen de sedimentatie tussen iedere loding bepaald waarna de bijbehorende waarde van A is bepaald. De waarde van A varieerde hierbij tussen de -0,03/week tot 0,3/week met een gemiddelde van 0,04/week.

Deze uitkomsten zijn vervolgens gecontroleerd door voor een lange periode de gemiddelde sedimentatie te bepalen en vervolgens met behulp van het model de waarde van A hiervoor terug te zoeken. De waarde voor A die hierdoor is gevonden is 0,0045/week. In de eerste methode zijn veel meer aannamen gemaakt dan bij de tweede methode. Voor de gemiddelde sedimentatie wordt daarom de waarde zoals die in de controle is bepaald reëler geacht. In het model zal daarom gerekend worden met een waarde van A van 0,0045/week. Een uitgebreide berekening staat in bijlage 9.

Parameter Af

De parameter Af wordt gebruikt voor de simulatie van de werkelijke bodemhoogte. Om een werkelijk bodemverloop te simuleren wordt de sedimentatie iedere simulatiestap willekeurig gekozen. Dit wordt gedaan door de parameter A die van belang is bij de

bepaling van de sedimentatie telkens willekeurig uit een normale verdeling te rond Parameter A te trekken. Daarbij wordt Af gebruikt als de standaarddeviatie rond parameter A. De waarden die zijn bepaald voor parameter A laten een grote spreiding zien. Als de standaarddeviatie uit deze waarde, 0,047/week wordt gebruikt zal de sedimentatie explosief toe- of afnemen. Volgens de foutvoortplanting kan de afwijking oplopen tot een verschil van wel 45 cm sedimentatie per week. Bij een gemiddelde sedimentatie van bijna 6 cm per week is dit erg veel. Door de onzekerheid rond de parameter A zullen de gevonden waarden wellicht meer spreiding vertonen dan in werkelijkheid. De standaarddeviatie Af, van de parameter A wordt daarom lager aangehouden en is bepaald op 0,01/week.

De begin/aanlegdiepte $Z(0)$

Er wordt bij doorrekening in het model van uitgegaan dat de geul in het begin op aanlegdiepte is. Voor de eerste kilometer van de Maasgeul is de aanlegdiepte 25,20 meter beneden het middenstandsvlak.

De evenwichtsdiepte $Z(\infty)$

Z_{∞} is de bodemhoogte die zou ontstaan indien er geen onderhoud zou plaatsvinden. Deze evenwichtswaarde is moeilijk te bepalen omdat er veel veranderingen hebben plaatsgevonden in de benedenloop van de Maas. De Haringvliet sluizen hebben de verdeling van het water drastisch veranderd. Voor de aanleg van het Haringvliet vond er ook al onderhoud plaats aan de vaargeul. Uit archiefmateriaal van Rijkswaterstaat (zie bijlage 11; Streefdiepte van 1950 tot 1979) kan echter opgemaakt worden dat de bodemhoogte in de evenwichtstoestand op ongeveer -12 meter ten opzichte van het middenstandsvlak ligt.

De onnauwkeurigheid rond loden σ (loden)

Zoals beschreven in hoofdstuk 2 bedraagt de onnauwkeurigheid rond loden, uitgedrukt in de standaarddeviatie, 10 cm.

De onnauwkeurigheid rond baggeren σ (baggeren)

Zoals beschreven in hoofdstuk 2 bedraagt de onnauwkeurigheid rond een baggeringreep, uitgedrukt in de standaarddeviatie, 20 cm.

De onnauwkeurigheid rond de sedimentatievoorspelling σ (sedimentatie)

De onzekerheid rond de sedimentatievoorspelling wordt veroorzaakt door de voortplanting van de fouten rond de parameters die gebruikt worden voor de voorspelling van de sedimentatie (zie bijlage 12; foutvoortplanting). Omdat de grote van de fout rond de parameters niet voor alle parameters goed bekend is wordt in het model de fout rond de sedimentatievoorspelling bepaald als percentage van de verwachte sedimentatie. De onzekerheid neemt hierdoor in de tijd toe, maar zal naarmate de evenwichtsdiepte wordt bereikt niet meer toenemen.

Omdat de fout het grootste gedeelte van de voorspelling afhangt van de fout in de parameter A wordt de fout in de sedimentatievoorspelling hierop gebaseerd. De gebruikte standaarddeviatie van de parameter A bedraagt 2 maal de waarde van de parameter zelf.

De fout rond de sedimentatievoorspelling wordt daarom bepaald op 200%.

De betrouwbaarheid α

De betrouwbaarheid geeft een factor aan waarvoor geldt dat de bodem voor deze betrouwbaarheid onder zal liggen. Voor de maatgevende bodemhoogte wordt een betrouwbaarheid van 99% gehanteerd. Dit wil zeggen dat de bodem in 99 van de 100 gevallen de bodem onder de maatgevende bodemhoogte zal liggen.

Het baggervolume

Voor de berekening van de baggerkosten wordt het baggervolume gebruikt als invoer parameter. Deze parameter kan echter zowel invoer als uitvoer zijn. Indien er gekozen wordt om altijd tot hetzelfde constante niveau te baggeren is de baggerhoeveelheid niet bekend. De baggerhoeveelheid kan verschillen per ingreep. Als uitvoer wordt de gemiddeld gebaggerde hoeveelheid weergegeven.

Het aantal baggeringrepen

Het aantal baggeringrepen kan zowel een invoer- als uitvoer parameter zijn. Bij periodiek baggeren dient het als invoer parameter en bij toestandsafhankelijk baggeren is het een uitvoer parameter.

Het aantal lodingen

Het aantal lodingen kan zowel input zijn als uitvoer. Bij periodiek loden dient het als input en bij toestandsafhankelijk loden is het een uitvoer parameter.

De maximaal acceptabele onzekerheid

De maximaal acceptabele onzekerheid rond de voorspelling van de bodemhoogte is afhankelijk van de gehanteerde baggermarge. Bij de eerste simulaties wordt een maximaal acceptabele onzekerheid van 150 cm gehanteerd.

De minimale onzekerheid

De minimale onzekerheid bepaalt wanneer er beter eerst gelood kan worden in plaats van te baggeren. Bij een overschatting van de bodemhoogte hoeft er niet gebaggerd te worden omdat de bodem nog niet de kritische waarde heeft bereikt. Bij de eerste simulaties wordt een minimale onzekerheid van 100 cm gehanteerd.

Uitvoer parameters

De uitvoerparameters die ook invoerparameter kunnen zijn worden hier niet meer behandeld omdat deze in de vorige paragraaf al aan bod zijn gekomen.

Maximaal opgetreden kans op overschrijding

Iedere tijdstap wordt berekend wat, met de gegeven onzekerheid, de kans is dat de verwachte bodemhoogte toch boven de kritische waarde komt. De cumulatieve kans wordt berekend dat de verwachte bodemhoogte boven de kritische bodemhoogte zou komen. De totale aanwezige onzekerheid rond de verwachting wordt hierbij als standaarddeviatie gebruikt.

Gemiddelde kosten

De gemiddelde kosten worden uitgedrukt in de totale onderhoudskosten per week.

6 Alternatieve scenario's

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de met het model doorgerekende alternatieve scenario's besproken. De volgorde waarin de verschillende scenario's worden besproken verschilt van de volgorde uit hoofdstuk 5. Dit komt omdat er begonnen wordt met de simulatie van het scenario dat het huidige onderhoud het best benaderd. De volgende drie 'soorten' scenario's zullen worden gesimuleerd;

- A. Het huidige onderhoud, periodiek loden en toestandsafhankelijk baggeren.
- B. Een alternatief waarin beide beslissingen toestandsafhankelijk zijn.
- C. Een alternatief waarin beide beslissingen periodiek zijn.

Binnen de scenario's zullen verschillende parameter instellingen worden gesimuleerd om binnen ieder scenario een optimale strategie te bepalen. Na ieder 'soort' scenario zal een conclusie volgen en aan het eind van het hoofdstuk zal er een conclusie volgen over alle scenario's.

De gemiddelde waarden uit de simulatiereeksen zijn nog niet volledig stabiel. Eén extreme waarde kan de gemiddelden al met bijna 3% doen stijgen of dalen. Om een stabiel gemiddelde te kunnen bepalen dienen ongeveer 80 tot 100 simulaties uitgevoerd te worden. Omdat de gemiddelden allemaal zeer dicht bij elkaar liggen en de spreiding rondom de gemiddelden redelijk groot is zullen er echter niet meer simulaties worden uitgevoerd.

Doordat de sedimentatie niet lineair wordt voorspeld en het werkelijke bodemverloop wordt gesimuleerd door de parameter A willekeurig uit een normale verdeling te nemen zijn de resultaten niet symmetrisch rond het gemiddelde. Doordat de parameter A in de macht van een exponentiele functie staat levert een waarde van A in de richting van nul een kleiner verschil op dan een zelfde verschil rond A in de richting van nul vandaan. Dit effect is ook duidelijk te zien in bijlage 10, de invloed van parameter A.

Hierdoor komt het gemiddelde van de simulaties ook niet overeen met de uitkomst van de simulatie waarbij de standaardafwijking rond parameter A naar nul nadert. De simulaties waarbij de sedimentatie groter is zullen een grotere spreiding van de resultaten geven. Het gemiddelde van de simulaties zal daarom ook niet in het midden van de uiterst waargenomen waarden liggen. Voor de maat van de spreiding is de grootste waargenomen afwijking van het gemiddelde genomen. De resultaten van alle simulaties per scenario zijn bijgevoegd in bijlage 13. In onderstaande tabel worden de 'standaard' parameter waarden weergegeven. Voor de keuze van de baggerhoeveelheid wordt standaard tot de aanlegdiepte gebaggerd. Tenzij anders vermeld zullen deze waarden worden aangehouden in de simulaties.

Tabel 4: 'Standaard' parameter waarden

Parameter	Waarde	Eenheid
T	260	Weken
A	0,0045	Week ⁻¹
Af	0,01	Week ⁻¹
Z(0)	-2520	cm
Z(∞)	-1200	cm
Z kritisch	-2340	cm
σ (loden)	10	cm
σ (baggeren)	30	cm
σ (sedimentatie)	200	%
Betrouwbaarheid (kans $Z(t) > Z$ kritisch)	0.99	Dimensieloos
Maximale onzekerheid	200	cm
Minimale onzekerheid	150	cm
Kostprijs baggeren	0,52	€/m ³

6.1 Het huidig onderhoud, periodiek loden en toestandsafhankelijk baggeren

Het eerste scenario dat wordt gesimuleerd is zoals het huidige onderhoud wordt gedaan. Zoals uit hoofdstuk 3 blijkt wordt het baggeren toestandsafhankelijk gedaan en het loden periodiek. Toestandsafhankelijk houdt in werkelijkheid echter in dat er aan de hand van de data van de lodingen baggeringrepen worden gepland. In het model wordt bij toestandsafhankelijk baggeren echter ingegrepen aan de hand van de verwachte bodemhoogte.

Het huidige onderhoud (Scenario A1)

Er wordt telkens tot de aanlegdiepte gebaggerd. In het huidige onderhoud wordt ongeveer eens per maand gelood. Het aantal lodingen in 260 weken komt daarmee op 65.

	Gemiddeld	Spreiding absoluut	Spreiding relatief
Aantal lodingen	65	n.v.t.	n.v.t.
Aantal baggeringrepen	15	+/- 2	13%
Baggerhoeveelheid per keer	92	+/- 7	7%
Gemiddelde kosten per week	€15.500,-	+/- €2.500,-	15%
Opgetreden kans op overschrijding	0,01	-	

Opvallend is dat de hoogst genoteerde gemiddeld gebaggerde hoeveelheid werd waargenomen bij het hoogste aantal ingrepen en vice versa. Dit wordt verklaard door het verschil in de totale gesedimenteerde hoeveelheden tussen de simulaties.

Met een simulatietijd van 260 weken betekent 16 keer baggeren dat er ongeveer eens per 4 maanden gebaggerd wordt. In werkelijkheid vindt er echter bijna wekelijks onderhoud plaats. Dit verschil wordt verklaard door het feit dat de geul in het model in een ingreep over de gehele breedte wordt verdiept terwijl daar in werkelijkheid meerdere ingrepen

voor nodig zijn. De gebaggerde hoeveelheden uit bijlage 3 worden niet over de gehele breedte van de geul verwijderd maar meer plaatselijk.

Alternatieve parameter instellingen

Lagere betrouwbaarheid (scenario A2)

Door een lagere betrouwbaarheid zal de maatgevende bodemhoogte dichter bij de verwachte bodemhoogte liggen. Hierdoor zal de maatgevende bodemhoogte lager komen te liggen waardoor er verwacht wordt dat er minder baggeringrepen nodig zullen zijn. De te baggeren hoeveelheid zal waarschijnlijk wel toenemen als gevolg van het minder vaak baggeren.

Een verlaging van de betrouwbaarheid van 0,99 naar 0,90 levert de volgende resultaten:

Tabel 6: resultaten scenario A2	Gemiddeld	Spreiding absoluut	Spreiding relatief
Aantal lodingen	65	n.v.t.	
Aantal baggeringrepen	10	+/- 3	31%
Baggerhoeveelheid per keer	142 cm	+/- 8 cm	4%
Gemiddelde kosten per week	€15.500,-	+/- €4.900,-	34%
Opgetreden kans op overschrijding	0,3	-	

De te baggeren hoeveelheid is met ongeveer een halve meter gestegen en daardoor wel erg groot geworden. Om in werkelijkheid dergelijke hoeveelheden binnen een periode van een week, een tijdstap in een simulatie, te verwijderen zal er een hoge capaciteit moeten worden ingezet. Voor langere gedeelten van de vaargeul zal het niet mogelijk zijn om dergelijke verdiepingen in een korte periode te realiseren.

Als direct gevolg van de lagere betrouwbaarheid is de kans dat de bodem toch boven de kritische bodemhoogte komt veel groter geworden. Omdat deze toename zeer ongewenst is zal bij de overige scenario's daarom altijd van een betrouwbaarheid van 0,99 worden uitgegaan.

Loodfrequentie halveren (scenario A3)

Door een langere periode tussen de lodingen in kan de onzekerheid langer toenemen en dus groter worden. Een grotere onzekerheid betekent dat de maatgevende bodemhoogte hoger zal liggen, waardoor deze vaker de kritische waarde zal bereiken. Dat betekent dat er waarschijnlijk vaker gebaggerd zal moeten worden.

De gehanteerde loodfrequentie van één keer per 4 weken wordt verlaagd naar één keer per 8 weken. Het totale aantal lodingen in de simulatietijd van 260 weken komt daarmee op 32 wat de volgende resultaten oplevert:

Tabel 7: resultaten scenario A3	Gemiddeld	Spreiding absoluut	Spreiding relatief
Aantal lodingen	32	n.v.t.	n.v.t.
Aantal baggeringrepen	85	+/- 8	9%
Baggerhoeveelheid per keer	18 cm	+/- 4 cm	21%
Gemiddelde kosten per week	€15.600,-	+/- €3.800,-	24%
Opgetreden kans op overschrijding	0,06	-	

De halvering van het aantal lodingen heeft tot gevolg dat het benodigde aantal baggeringrepen bijna vijf keer zoveel is geworden en de gemiddeld te baggeren hoeveelheid met ongeveer dezelfde factor is gedaald. Door de stijging van het aantal baggeringrepen in combinatie met het gereduceerde aantal lodingen is de kans op een overschrijding van de kritische bodemhoogte sterk gestegen.

Baggermarge vergroten (scenario A4)

Door het vergroten van de baggermarge kan er meer onzekerheid worden toegestaan rond de verwachte bodemhoogte. Omdat het periodiek gebeurd en het aantal lodingen gelijk wordt gehouden zal de onzekerheid even vaak worden teruggebracht. De maatgevende bodemhoogte zal dus minder vaak de kritische waarde bereiken. De verwachting is dat er hierdoor minder baggeringrepen nodig zullen zijn, maar dat de baggeringrepen wel groter zullen worden.

De baggermarge wordt met 80 cm vergroot door de aanlegdiepte naar -2600 cm beneden het middenstandsvlak te brengen. De uitkomsten van de simulaties staan hieronder in tabel weergegeven.

Tabel 8: resultaten scenario A4	Gemiddeld	Spreiding absoluut	Spreiding relatief
Aantal lodingen	65	n.v.t.	n.v.t.
Aantal baggeringrepen	8	+/- 2	24%
Baggerhoeveelheid per keer	173 cm	+/- 13 cm	8%
Gemiddelde kosten per week	€15.600,-	+/- €4.500,-	29%
Opgetreden kans op overschrijding	0,01	-	

Zoals verwacht is het benodigde aantal baggeringrepen gedaald en zelfs gehalveerd. De grote van een baggeringreep is echter wel zeer sterk gestegen. In werkelijkheid zal een dergelijke verdieping echter niet in één week te realiseren zijn. Een benodigd aantal van 8 ingrepen in 5 jaar betekent echter dat er ongeveer eens in de 8 maanden een ingreep nodig is. Hierdoor wordt de verdieping relatief nog steeds in één baggeringreep gerealiseerd. Dat een verdieping van ongeveer 175cm niet binnen een week realiseerbaar is hoeft dus geen bezwaar te zijn tegen dit scenario.

Baggermarge vergroten in combinatie met halveren loodfrequentie (scenario A5)

Omdat voorgaande twee scenario's tegengestelde uitkomsten opleveren worden deze gecombineerd. De stijging in het aantal baggeringrepen dat wordt veroorzaakt door halvering van de lodingfrequentie zal verminderen door de grotere baggermarge. De onzekerheid neemt langer toe door de langere periode tussen de lodingen maar door de grotere baggermarge kan de onzekerheid ook meer toenemen voordat de maatgevende bodemhoogte de kritische waarde zal bereiken.

De baggermarge wordt met 80 cm vergroot door de aanlegdiepte naar -2600 cm beneden het middenstandsvlak te brengen en de lodingfrequentie wordt verlaagd tot eens per 2 maanden. De resultaten van dit scenario zien er als volgt uit:

Tabel 9: resultaten scenario A5

	Gemiddeld	Spreiding absoluut	Spreiding relatief
Aantal lodingen	32	n.v.t.	n.v.t.
Aantal baggeringrepen	26	+/- 3	12%
Baggerhoeveelheid per keer	63 cm	+/- 10 cm	16%
Gemiddelde kosten per week	€16.700,-	+/- €5.200,-	31%
Opgetreden kans op overschrijding	0,01	-	

Er moet iets vaker gebaggerd worden dan volgens de uitkomsten bij simulatie van het huidige onderhoud en de gemiddeld te baggeren hoeveelheid is afgenomen. De stijging van de kans op overschrijding van de kritische bodemhoogte zoals die werd veroorzaakt door halvering van de lodingfrequentie (scenario A3) wordt weer ongedaan gemaakt door de grotere baggermarge. Uiteindelijk kan er dus met een minder totaal aantal ingrepen (loden + baggeren) worden volstaan zonder dat dit ten koste gaat van de veiligheid.

Conclusie periodiek loden en toestandsafhankelijk baggeren

De resultaten van de hierboven besproken scenario's worden hieronder samengevat in een tabel weergegeven.

Tabel 10: resultaten scenario's periodiek loden en toestandsafhankelijk baggeren.

Scenario		A1	A2	A3	A4	A5
Aantal lodingen	Gemiddeld	65	65	32	65	32
	Spreiding	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Aantal baggeringrepen	Gemiddeld	15	10	86	8	26
	Spreiding	2	3	9	2	3
Baggerhoeveelheid	Gemiddeld	92 cm	142 cm	18 cm	173 cm	63 cm
	Spreiding	7 cm	8 cm	4 cm	15 cm	10 cm
Gemiddelde kosten/week	Gemiddeld	€15.500,-	€15.500,-	€15.600,-	€15.600,-	€16.700,-
	Spreiding	€2.300,-	€4.900,-	€3.800,-	€4.500,-	€5.200,-
P(Z _m >Z _k)		0,01	0,3	0,06	0,01	0,01

De resultaten liggen wat betreft kosten allemaal dicht bij elkaar. De spreiding rond de resultaten is ook overall erg groot. Zoals uit het tweede scenario blijkt biedt het verlagen van de betrouwbaarheid geen alternatief, omdat hierdoor de kans op overschrijding van de kritische bodemhoogte te groot wordt. Het huidige onderhoud laat de minste spreiding zien. Scenario A5, het vergroten van de baggermarge in combinatie met het halveren van de loodfrequentie, heeft de hoogste verwachte kosten. Bij het vergroten van de baggermarge (scenario A4) wordt de gemiddeld te baggeren hoeveelheid erg groot.

6.2 Alternatief waarin beide beslissingen toestandsafhankelijk zijn

In het geval van periodiek loden kan niet worden ingespeeld op de omstandigheden. Bij gunstige omstandigheden kan het voorkomen dat er al gelood wordt terwijl er nog niet direct behoefte bestaat om de exacte ligging van de bodem te bepalen omdat ligging van de bodem nog voldoende nauwkeurig voorspeld kan worden. Uiteraard kunnen er zich situaties voordoen waardoor een loding al eerder wordt vereist om bijvoorbeeld de gevolgen van een storm op de bodemligging te bepalen. Door het uitstellen van lodingen

kan een besparing worden gerealiseerd omdat er dan uiteindelijk minder lodingen worden uitgevoerd.

In dit scenario dient een maximaal acceptabele onzekerheid bepaald te worden evenals een minimale onzekerheid die de keuze tussen loden en baggeren bepaald.

Parameterwaarden lijkend op huidig onderhoud (scenario B1)

In het eerste alternatief zal er gerekend worden met een maximaal acceptabele onzekerheid van 150 cm en een minimale onzekerheid van 100 cm waarbij er telkens tot de aanlegdiepte gebaggerd wordt. De resultaten zijn als volgt:

Tabel 11: resultaten scenario B1	Gemiddeld	Spreiding absoluut	Spreiding relatief
Aantal lodingen	31	+/- 1	3%
Aantal baggeringrepen	63	+/- 6	10%
Baggerhoeveelheid per keer	24 cm	+/- 7 cm	29%
Gemiddelde kosten per week	€15.800,-	+/- €4.600,-	29%
Opgetreden kans op overschrijding	0,01	-	

Het aantal baggeringrepen is sterk gestegen. Met dik 60 ingrepen in 5 jaar wordt het baggerinterval ongeveer eens in de maand waarbij de geul dan telkens bijna 25 cm verdiept dient te worden. Het benodigde aantal lodingen blijkt slechts de helft van het huidige aantal lodingen. Dit is erg gunstig omdat lodingen altijd over grotere gedeelten van de geul worden uitgevoerd en er verderop in de Maasgeul steeds minder onderhoud nodig is.

Alternatieve parameterwaarden

Aanlegdiepte vergroten/baggermarge vergroten (scenario B2)

In tegenstelling tot scenario A4 zal de onzekerheid nu niet groter worden omdat het loden niet meer periodiek gebeurt. De baggeringrepen zullen groter worden omdat er telkens tot een zelfde diepte wordt gebaggerd maar er pas ingegrepen wordt zodra de maatgevende bodemhoogte de kritische waarde bereikt.

Bij een verlaging van de aanlegdiepte tot -2600cm beneden het middenstandvlak zien de resultaten er als volgt uit.

Tabel 12: resultaten scenario B2	Gemiddeld	Spreiding absoluut	Spreiding relatief
Aantal lodingen	29	0	0%
Aantal baggeringrepen	21	+/-5	23%
Baggerhoeveelheid per keer	76 cm	+/- 8 cm	11%
Gemiddelde kosten per week	€16.400,-	+/- €5.100,-	31%
Opgetreden kans op overschrijding	0,01	-	

Er dient minder vaak gebaggerd te worden maar de baggerhoeveelheid neemt met dezelfde factor toe. Daarnaast kan er met bijna hetzelfde aantal lodingen kan worden volstaan. De kans op overschrijding van de kritische waarde blijft verder gelijk. Opvallend is dat het benodigde aantal lodingen geen enkele spreiding vertoont.

Het vergroten van de baggermarge heeft dus voornamelijk invloed op de grote en het aantal baggeringrepen.

Maximaal acceptabele onzekerheid en minimale onzekerheid verkleinen (scenario B3)

Omdat de maximaal acceptabele onzekerheid niet vaak werd bereikt worden zowel de maximaal acceptabele onzekerheid als de minimale onzekerheid verlaagd. Hierdoor zullen er meer lodingen nodig zijn, maar doordat de bodemvoorspelling vaker gecontroleerd en gecorrigeerd wordt zal de onzekerheid klein blijven en zal de maatgevende bodemhoogte dus minder snel de kritische waarde bereiken waardoor er minder vaak gebaggerd hoeft te worden.

Omdat de hoogst opgetreden onzekerheid niet ver boven de 100 cm lag zal de maximaal acceptabele onzekerheid wordt verlaagd tot 100 cm en om de verhoudingen ongeveer gelijk te houden wordt de minimale onzekerheid verlaagd tot 70 cm.

	Gemiddeld	Spreiding absoluut	Spreiding relatief
Aantal lodingen	39	+/- 1	3%
Aantal baggeringrepen	21	+/-6	27%
Baggerhoeveelheid per keer	69	+/- 8	11%
Gemiddelde kosten per week	€15.600,-	+/- €5.200,-	33%
Opgetreden kans op overschrijding	0,01	-	

Er dient vaker gelood te worden, er is dus meer controle en de kans op overschrijding van de kritische bodemhoogte blijft dus laag. Doordat er eerder wordt gelood wordt er pas gebaggerd zodra de maatgevende bodemhoogte wordt bereikt én de onzekerheid klein is. Het aantal benodigde baggeringrepen is hierdoor gedaald en de grootte van de ingrepen gestegen.

Geen minimale onzekerheid, altijd direct baggeren (scenario B4)

Door het gelijkstellen van de minimale onzekerheid aan de maximaal acceptabele onzekerheid wordt de invloed van de minimale onzekerheid uitgeschakeld. Er wordt dan immers alleen gelood zodra de maximale onzekerheid is bereikt. Indien de maatgevende bodemhoogte de kritische waarde bereikt er dus altijd gebaggerd worden ook al is er een grote onzekerheid rond de voorspelde bodemhoogte. Het uiteindelijke aantal baggeringrepen zal dus stijgen, maar het benodigde aantal lodingen zal vergeleken met het voorgaande scenario afnemen.

Voor zowel de maximale als de minimale onzekerheid wordt 100 cm aangehouden waardoor de resultaten er als volgt uit zien:

	Gemiddeld	Spreiding absoluut	Spreiding relatief
Aantal lodingen	31	+/- 0	3%
Aantal baggeringrepen	63	+/- 13	21%
Baggerhoeveelheid per week	24 cm	+/- 3 cm	13%
Gemiddelde kosten per week	€15.900,-	+/- €4.700,-	30%
Opgetreden kans op overschrijding	0,05	-	

Zoals verwacht is het aantal benodigde lodingen gedaald. Het benodigde aantal baggeringrepen is ook gestegen maar veel sterker dan de daling van het aantal lodingen. Er dient nu drie maal zovaak gebaggerd te worden. De minimale onzekerheid heeft dus een grote invloed op het onderhoud.

Verder is het opvallend dat de hoogste opgetreden kans op overschrijding is gestegen.

Lage maximaal acceptabele onzekerheid (scenario B5)

De maximaal acceptabele onzekerheid wordt verlaagd tot 70 centimeter. Omdat de maximaal acceptabele onzekerheid laag is wordt de minimale onzekerheid hieraan gelijkgesteld. De onzekerheid wordt niet meer zo groot. Zodra de maatgevende bodemhoogte de kritische waarde bereikt zal er direct gebaggerd moeten worden omdat de onzekerheid beperkt is. De resultaten staan in onderstaande tabel.

Tabel 15: resultaten scenario B5	Gemiddeld	Absolute spreiding	Spreiding relatief
Aantal lodingen	43	+/- 0	0%
Aantal baggeringrepen	21	+/- 7	32%
Baggerhoeveelheid per keer	68 cm	+/- 6 cm	9%
Gemiddelde kosten per week	€15.000,-	+/- €5.100,-	35%
Opgetreden kans op overschrijding	0,01	-	

Het aantal lodingen is met ongeveer een derde gestegen maar het aantal baggeringrepen is met een factor drie gedaald. Het totale aantal benodigde ingrepen is dus gestegen. Er dient nu voor iedere baggeringreep twee maal gelood te worden. Omdat het loden voor en groot gedeelte van de geul juist de grootste kostenpost is geworden is dit een ongunstige ontwikkeling. Opvallend hierbij is dat het aantal lodingen geen enkele spreiding vertoont. De kans op overschrijding is weer gedaald tot 0,01.

De verhouding lodingen/baggeringrepen is geheel omgedraaid door de verlaging van de maximale acceptabele onzekerheid met 30 cm.

Door vaker te loden en is het echter wel mogelijk om betere controle over de baggeringrepen uit te voeren. Met de data die zo verkregen wordt kan er ook verder en beter onderzoek gedaan worden naar de sedimentatie in de geul.

Vaste baggerhoeveelheid (scenario B6)

Bij periodiek onderhoud is het baggeren met een vaste hoeveelheid geen mogelijkheid omdat de bodem dan op lange duur omlaag of omhoog kan komen omdat de gebaggerde hoeveelheid meer of minder is dan de totale hoeveelheid sedimentatie. Bij toestandsafhankelijk onderhoud wordt het baggerinterval vanzelf aangepast indien er te veel of te weinig wordt gebaggerd. Hoe groter de baggeringrepen hoe minder vaak er ook gebaggerd zal moeten worden.

In plaats van telkens tot de aanlegdiepte te baggeren wordt er telkens een vaste hoeveelheid gebaggerd. Er zal eerst een kleine hoeveelheid, 25cm, worden gesimuleerd en vervolgens een grote, 100cm. Op deze wijze wordt inzicht gekregen in de verschillen tussen beide onderhoud scenario's.

Resultaten bij een gemiddeld te baggeren hoeveelheid van 25cm:

Tabel 16: resultaten scenario B6.1	Gemiddeld	Absolute spreiding	Spreiding relatief
Aantal lodingen	31	+/- 1	
Aantal baggeringrepen	60	+/- 19	32%
Baggerhoeveelheid per keer	25 cm	n.v.t.	n.v.t.
Gemiddelde kosten per week	€15.700,-	+/- €4.800,-	31%
Opgetreden kans op overschrijding	0,08	-	

Bij een gemiddeld gebaggerde hoeveelheid van 25cm ontstaan er grote kansen op overschrijding van de kritische hoogte. Dit komt doordat de baggermarge die ontstaat na een baggeringreep heel klein is.

Resultaten bij een gemiddeld te baggeren hoeveelheid van 100cm:

Tabel 17: resultaten scenario B6.2	Gemiddeld	Absolute spreiding	Spreiding relatief
Aantal lodingen	27	+/- 1	4%
Aantal baggeringrepen	17	+/- 5	32%
Baggerhoeveelheid per keer	100 cm	n.v.t.	n.v.t.
Gemiddelde kosten per week	€17.300,-	+/- €5.300,-	31%
Opgetreden kans op overschrijding	0,01	-	

Het benodigde aantal ingrepen is niet hoog. Ook de verhouding tussen loden en baggeren is gunstig. Wat opvalt, is dat de gemiddelde onderhoudskosten hoog zijn. De gemiddelden zijn, zoals al eerder verteld, nog niet stabiel, maar het gemiddelde wijkt duidelijk af van die van de overige simulaties. Er mag dan ook verwacht worden dat dit uiteindelijk een duurder scenario zal zijn.

Altijd eerst loden bij bereiken van de kritische bodemhoogte (scenario B7)

De minimale onzekerheid wordt hierbij op 20 cm gezet. Als de minimale onzekerheid kleiner wordt zal het model iedere tijdstep loden. Dit komt omdat het model na een loding niet in dezelfde tijdstep nog een baggeringreep uitvoert. In werkelijkheid is er namelijk voor een loding en de verwerking daarvan ook meerdere dagen nodig.

De bodem wordt dus niet verdiept en de volgende simulatiestap zal het model weer een loding uitvoeren omdat de kritische bodemhoogte nog steeds is overschreden. Bij een minimale bodemhoogte die iets groter is dan de onzekerheid na een simulatiestap wordt deze cirkel doorbroken en zal er de eerstvolgende simulatiestap na een loding wel een baggeringreep plaatsvinden.

De uitkomsten van dit scenario met een maximale acceptabele onzekerheid van 100 cm lieten al na enkele simulaties zien dat er grote kansen op overschrijding van de kritische bodemhoogte optraden. Dit wordt veroorzaakt doordat het model niet in een simulatiestap zowel kan loden als baggeren. Bij bereiken van de kritische bodemhoogte wordt eerst gelood en pas de volgende simulatiestap wordt er een baggeringreep uitgevoerd. De bodemhoogte stijgt ondertussen nog wel waardoor er grote kansen op overschrijding ontstaan. Het is dus aan te raden om bij een lage onzekerheid altijd eerst te baggeren zodra de kritische bodemhoogte wordt bereikt.

Conclusie geheel toestandsafhankelijk onderhoud

De resultaten van alle scenario's met geheel toestandsafhankelijk onderhoud worden op de volgende bladzijde samengevat en in een tabel weergegeven.

Tabel 18: resultaten scenario's geheel toestandsafhankelijk onderhoud

Scenario		B1	B2	B3	B4	B5
Aantal lodingen	Gemiddeld	31	29	39	31	43
	Spreiding	1	0	1	0	0
Aantal baggeringrepen	Gemiddeld	63	21	21	63	21
	Spreiding	6	5	6	13	7
Bagger hoeveelheid	Gemiddeld	24 cm	76 cm	69 cm	24 cm	68 cm
	Spreiding	7 cm	8 cm	8 cm	3 cm	6 cm
Gemiddelde kosten/week	Gemiddeld	€15.800,-	€16.400,-	€15.600,-	€15.900,-	€15.000,-
	Spreiding	€4.600,-	€5.100,-	€5.200,-	€4.700,-	€5.100,-
P(Zm>Zk)		0,05	0,01	0,01	0,05	0,01

Ook in dit scenario liggen de gemiddelde kosten dicht bij elkaar en laten de resultaten een grote spreiding zien. Het vergroten van de baggermarge (scenario B2) heeft ook in dit scenario de hoogste gemiddelde onderhoudskosten per week.

Het scenario dat het huidige situatie het meest benaderd en het scenario waarbij er geen minimale onzekerheid wordt gehanteerd maar er direct wordt gebaggerd hebben het hoogste aantal baggeringrepen en de grootste kans op een overschrijding van de kritische bodemhoogte.

Bij de scenario's B3 (maximaal acceptabele onzekerheid en minimale onzekerheid verkleinen) en B5 (lage maximaal acceptabele onzekerheid) zijn er meer lodingen nodig maar de gemiddelde onderhoudskosten zijn wel iets lager. Dat kan worden verklaard omdat er in deze scenario's veel controle is en er dus niet wordt gebaggerd terwijl er een grote onzekerheid rond de bodemligging is, waardoor onnodig baggeren wordt voorkomen.

De laatste twee gesimuleerde alternatieven, met een vaste baggerhoeveelheid (scenario B6) en waarbij er altijd eerst gelood wordt bij het bereiken van de kritische bodemhoogte (scenario B7) bieden geen serieus alternatief.

6.3 Alternatief waarin beide beslissingen periodiek zijn

Omdat er bij toestandsafhankelijk baggeren niet altijd vooraf duidelijk is hoeveel er gebaggerd dient te worden kan dit wel eens problemen opleveren met de beschikbare baggercapaciteit. Daarom kan het te eenvoudiger zijn om periodiek te baggeren zodat altijd van te voren bekend is waar, wanneer en welke capaciteit benodigd is. De baggerhoeveelheid dient in dit scenario altijd tot de aanlegdiepte te wezen.

Parameterwaarden lijkend op huidig onderhoud (scenario C1)

In het huidige onderhoud wordt er bijna wekelijks gebaggerd en ongeveer iedere 4 weken gelood. Voor een totale simulatietijd van 260 weken wordt het aantal baggeringrepen bepaald op 260 en het aantal lodingen op 65. De uitkomsten van de simulaties staan samengevat in tabel 19 op de volgende bladzijde:

Tabel 19: resultaten scenario C1	Gemiddeld	Absolute spreiding	Spreiding relatief
Aantal lodingen	65	n.v.t.	n.v.t.
Aantal baggeringrepen	260	n.v.t.	n.v.t.
Baggerhoeveelheid per keer	6 cm	+/- 2 cm	36%
Gemiddelde kosten per week	€16.400,-	+/- €5.400,-	33%
Opgetreden kans op overschrijding	0,02	-	

De (gemiddelde) onderhoudskosten per week zijn hoog maar omdat het gemiddelde nog niet erg stabiel is zou dit nog lager kunnen uitvallen indien er veel extremen tussen de simulaties zaten. Daarnaast is de spreiding rond de te baggeren hoeveelheid relatief nog niet zo groot geweest maar dit komt omdat er door het grote aantal baggeringrepen de absolute hoeveelheid ook erg laag is. De kans op een overschrijding is wel verdubbeld maar is nog steeds acceptabel.

Alternatieve parameter instellingen

Telkens baggeren met dezelfde hoeveelheid (scenario C2)

Bij het doorrekenen van dit scenario blijkt dat de bodem ongecontroleerd wegloopt van de aanlegdiepte. Afhankelijk van de baggerhoeveelheid gaat de bodem omlaag of omhoog. Door variatie in het verloop van de werkelijke bodemligging kan bij verschillende simulaties met dezelfde parameter instellingen de bodem zowel omhoog als omlaag komen. Een voorbeeld hiervan is te zien in de figuren Ben C van Bijlage 12: Grafieken modeluitkomsten. Omdat dit een ongewenste ontwikkeling is zal dit alternatief verder buiten beschouwing worden gelaten.

Verhogen van het aantal ingrepen (scenario C3)

Vaker loden betekent uiteraard dat de totale kosten van het loden zullen stijgen. Een stijging van het aantal baggeracties hoeft echter niet direct een stijging van de kosten te betekenen. De bodem komt na een verdieping immers sneller omhoog. Vaker baggeren betekent dat de bodem telkens niet veel verdiept hoeft te worden en dat de bodem dus minder snel omhoog zal komen. De totaal te baggeren hoeveelheid zal daardoor afnemen wat uiteindelijk een kostendaling zal betekenen. Omdat de kosten door het vaker loden sneller stijgen dan dat, door de afname van de totale baggerhoeveelheid, de kosten van baggeren dalen, zullen de totale onderhoudskosten stijgen bij een verhoging van het aantal ingrepen. Er zullen daarom ook geen simulaties met een verhoging van het aantal ingrepen worden doorgerekend.

Verlagen van het aantal ingrepen (scenario C4)

Om het aantal ingrepen te beperken zullen zowel het aantal lodingen als het aantal baggeringrepen worden verlaagd. Om een gunstige verhouding tussen loden en baggeren te houden zullen beide aantallen worden gehalveerd. Het aantal lodingen komt daarmee op 32 en het aantal baggeringrepen 130.

Tabel 20: resultaten scenario C4

	Gemiddeld	Absolute spreiding	Spreiding relatief
Aantal lodingen	32	n.v.t	n.v.t.
Aantal baggeringrepen	130	n.v.t.	n.v.t.
Baggerhoeveelheid per keer	11 cm	+/- 3 cm	29 %
Gemiddelde kosten per week	€14.900,-	+/- €4.000,-	28 %
Opgetreden kans op overschrijding	0,09	-	

Een verlaging van het aantal ingrepen heeft een stijging van de kans op overschrijding als gevolg. Dit valt te verklaren doordat de periode waarover geen ingrepen plaatsvindt langer wordt en de onzekerheid en de maatgevende bodemhoogte dus beide langere tijd toeneemt. Hoe lager het aantal ingrepen bij periodiek ingrijpen hoe groter de kans op overschrijding zal worden.

Conclusie geheel periodiek onderhoud

Geheel periodiek onderhoud biedt geen goed alternatief voor het huidige onderhoud. Dit komt doordat de kans op overschrijding van de kritische bodemhoogte stijgt zodra het aantal ingrepen wordt verlaagd. Dit komt omdat het systeem niet wordt bijgestuurd als gevolg van extreme veranderingen in de bodemgesteldheid. Om toch de veiligheid te kunnen blijven garanderen zal er daarom bij geheel periodiek onderhoud meer ingrepen moeten worden gedaan dan eigenlijk nodig is. Meer onderhoud betekent uiteraard meer kosten.

6.4 Conclusie alternatieve scenario's

De resultaten hebben een grote marge. Dit wordt veroorzaakt door de spreiding in het werkelijke bodemverloop. Als het werkelijke bodemverloop een grotere sedimentatie heeft stijgen de gemiddelde onderhoudskosten aanzienlijk. Hierdoor zou ieder scenario zowel duurder als goedkoper kunnen zijn dan het huidige onderhoud. Op basis van de gemiddelde onderhoudskosten per week kan er daarom niet goed een goedkoper alternatief geselecteerd worden.

Ondanks de grote spreiding rond de gemiddelde onderhoudskosten per week dient wel opgemerkt te worden dat de kosten van de scenario's waarbij de baggermarge vergroot wordt hogere gemiddelde kosten laten zien. Dit wordt verklaard doordat de sedimentatie exponentieel verloopt waarbij de bodem op grotere diepte sneller omhoog komt

De kosten van het onderhoud worden sterk gedomineerd door de kosten van het baggeren. Dit komt doordat er in het betreffende gebied veel gebaggerd moet worden. In het overige deel van de geul wordt minder gebaggerd waardoor de kosten van het loden daar een grotere rol spelen in de keuze voor de onderhoudstrategie. Negentig procent van de baggerwerkzaamheden in het G-vak wordt in de eerste kilometer uitgevoerd. In een ander deel van het G-vak zullen de kosten voor het baggeren daardoor veel lager uitvallen.

Om besparingen in het onderhoud voor een groter deel van de geul te realiseren is het van belang om de loodfrequentie te kunnen verlagen. In het huidige onderhoud, waarbij er nog niet veel bekend is over de voorspelling van de bodemhoogte en er dus periodiek wordt gelood, biedt het scenario waarin de loodfrequentie wordt gehalveerd in



combinatie met het vergroten van de baggermarge (scenario A5) het meeste perspectief. De kosten van het baggeren stijgen hierdoor wel.

Geheel periodiek onderhoud biedt geen goed alternatief voor het huidige onderhoud. Dit komt omdat er overbodige ingrepen worden uitgevoerd. Om te voorkomen dat de kans op overschrijding van de kritische bodemhoogte te hoog wordt dienen er ook veel ingrepen plaats te vinden.

7 Discussie

Doordat er vele vereenvoudigingen zijn gemaakt is er veel ruimte voor discussie. De ruimtelijke vereenvoudiging heeft een grote invloed op de resultaten. In het model is de diepte over de gehele breedte gelijk genomen. In werkelijkheid is de bodem aan de zijkant van de geul minder diep en zal de bodem daar sneller stijgen dan in het midden van de geul. Er zal daarom meer gebaggerd moeten worden aan de zijkant van de geul dan in het midden. In het model verloopt de sedimentatie en het baggeren echter uniform over de breedte en lengte van het vak. Hierdoor wordt er in het model pas gebaggerd zodra de gemiddelde bodemhoogte boven de kritische waarde komt. In werkelijkheid zal er aan de randen van de geul al eerder gebaggerd moeten worden.

Ook over de lengte van de geul verschilt de sedimentatie sterk. De sedimentatie in de eerste kilometer is veel groter dan in het overige deel van de geul. In de eerste vijf kilometer van de Maasgeul, het G-vak, vindt 90 procent van de bagger werkzaamheden plaats in de eerste kilometer. Op basis van de uitkomsten van het model toegepast op de eerste kilometer zal er vaak en/of veel gebaggerd moeten worden. Echter, voor het overige deel van het G-vak kan er volstaan worden met minder ingrepen.

Het loden van de geul wordt altijd voor enkele kilometers in één keer gedaan. De bepaalde onderhoudsstrategie zal daarom op enkele kilometers van de vaargeul toegepast moeten worden. Om een optimale strategie te bepalen voor een groter deel van de vaargeul, enkele kilometers, zal daarom de sedimentatie over de lengte van de geul zoveel mogelijk uniform moeten zijn.

Hoe kleiner de ruimtelijke eenheid in het model wordt gekozen, hoe kleiner de fout in de voorspelling van de bodemhoogte wordt. In dit onderzoek is de gekozen ruimtelijke eenheid één kilometer in de lengte van de geul en de gehele breedte, 500 meter, voor de breedte. Het onderzoeksgebied moet wel representatief zijn voor een groter deel van de geul. Dit komt omdat de onderhoudsstrategie uiteindelijk voor een groter deel van de geul toegepast wordt. Als het onderzoeksgebied te klein is en niet representatief voor de gehele geul zal er geen goede onderhoudsstrategie bepaald kunnen worden. Er is in dit onderzoek gekozen voor de eerste kilometer, omdat daar de meeste informatie over beschikbaar was. Dit deel van de geul bleek echter niet representatief voor de Maasgeul. Dat komt omdat de sedimentatie in de eerste kilometer veel groter is dan in het overige deel van de Maasgeul.

Het model in dit onderzoek is één dimensionaal. Dit betekent dat voor het onderzoeksgebied één diepte wordt gehanteerd. De Eurogeul, die veel verder zeewaarts ligt, heeft een sedimentatiepatroon met zandgolven. Als het model in dit gebied wordt toegepast zal het onderzoeksgebied niet te groot mogen zijn. De ruimtelijke eenheid mag niet groter zijn dan een zandgolf. De onzekerheid in de bodemvoorspelling wordt anders erg groot. De zandgolven worden tegelijk gelood, waardoor de lodingstrategie voor de golven gelijk zal moeten zijn. Om een goede onderhoudstrategie te bepalen zal het model daarom voor meerdere zandgolven toegepast moeten worden.

Iedere zandgolf wordt daarbij individueel afgetopt/verlaagd. Om het model op de Eurogeul toe te passen zal het onderzoeksgebied telkens één zandgolf moeten bevatten.

Voor de verwachte bodemhoogte wordt aangenomen dat de sedimentatie in de tijd constant is. In werkelijkheid varieert de sedimentatie zowel op korte als op lange termijn. Deze spreiding is meegenomen in de simulatie van het werkelijke bodemverloop. Omdat de parameter voor de bepaling van de sedimentatie iedere simulatiestap willekeurig wordt gekozen uit een normale verdeling rond het gemiddelde betekent dit dat de sedimentatie iedere simulatiestap een extreme waarde zou kunnen aannemen. De sedimentatiesnelheid is iedere simulatiestap onafhankelijk van de voorgaande situatie. Als er gerekend wordt met een kleine tijdseenheid kan het bodemverloop hierdoor sterker schommelen dan in werkelijkheid.

Doordat de sedimentatie niet constant is over de tijd is het moeilijk om periodiek onderhoud te plegen. De bodem komt niet iedere periode gelijkmatig omhoog waardoor er niet goed een constante baggerfrequentie bepaald kan worden. Om te voorkomen dat er te laat ingegrepen wordt zal de baggerfrequentie bij periodiek onderhoud daarom hoger moeten liggen dan altijd noodzakelijk is.

In het model wordt een baggeringreep in één simulatiestap uitgevoerd. Een verdieping van een groot deel van de geul zal in werkelijkheid meer tijd in beslag nemen. Hoe groter de verdieping, hoe groter het verschil tussen de tijd dat de bodem in het model en in werkelijkheid op diepte is gebracht. Gedurende de periode van het baggeren zal de bodem minder snel stijgen dan in het model omdat de bodem nog niet op dezelfde diepte is. Hierdoor zal de baggerfrequentie bij periodiek onderhoud in werkelijkheid lager zijn. Om een grote verdieping op korte termijn te realiseren zal een grote baggercapaciteit moeten worden ingezet. Een grotere baggercapaciteit zal waarschijnlijk hogere kosten met zich meebrengen. In het model zou een baggeringreep daarom over meerdere tijdseenheden gespreid moeten kunnen worden, afhankelijk van de grote van de baggeringreep.

Uit de resultaten van de simulaties blijkt dat het vergroten van de baggermarge een kleine stijging in de baggerkosten tot gevolg heeft. Deze stijging in baggerkosten wordt veroorzaakt door een grotere sedimentatie die wordt verklaard door het exponentiele verloop van de sedimentatiesnelheid. De verdiepingen zijn relatief klein ten opzichte van de evenwichtsdiepte waardoor de stijging in sedimentatiesnelheid klein is. De baggerkosten stijgen daardoor niet veel. Een grotere baggermarge laat wel ruimte voor minder ladingen waardoor de ladingkosten zullen dalen. Voor een groot gedeelte van de geul zullen de besparingen door het verlagen van de ladingfrequentie groter zijn dan de stijging in baggerkosten door een grotere sedimentatiesnelheid. De gevolgen van een grotere baggermarge voor de sedimentatie in het overige deel van de geul zal wel moeten worden onderzocht.

Periodiek onderhoud wordt in het model niet tussentijds bijgestuurd aan de hand van de data uit de ladingen. In werkelijkheid zal het onderhoud wel bijgestuurd worden aan de hand van de lading data. Het onderhoud wordt periodiek uitgevoerd, maar na een lading kan er besloten worden om eerder of later in te grijpen. Hierdoor ontstaat een soort combinatie van onderhoudsscenario's. Hierdoor is het mogelijk om het onderhoud geheel periodiek uit te voeren en het aantal ingrepen te verlagen.



De uitkomsten van de simulaties hebben een grote marge. Hierdoor is het moeilijk om een onderhoudsstrategie te bepalen aan de hand van de gemiddelde onderhoudskosten per week. Een verandering in onderhoudsstrategie zal ook een verandering in de overeengekomen baggerprijs betekenen. Het is moeilijk om aan te geven welke strategie een betere baggerprijs zal opleveren. In het model is voor alle baggerstrategieën dezelfde prijs per gebaggerde hoeveelheid gehanteerd. Hierdoor is het mogelijk dat sommige strategieën in werkelijkheid goedkoper of duurder zullen zijn dan uit het model is gebleken. Meer onderzoek naar de baggerprijs kan hier een beter inzicht in geven.

In het onderzoeksgebied wordt meer gebaggerd dan in het overige deel van de geul, waardoor de onderhoudskosten voor dit deel van de geul worden gedomineerd door de kosten voor het baggeren. In het overige deel van de geul bedragen de kosten voor het loden relatief veel meer. Om besparingen voor een groter deel van de geul te bewerkstelligen zal daarom de ladingfrequentie verlaagd moeten worden.

Omdat het loden door Rijkswaterstaat zelf wordt uitgevoerd zullen de kosten voor het loden bij een andere frequentie niet veel veranderen. Een halvering van de ladingfrequentie zal ook bijna een halvering van de kosten betekenen.

Om het loden toestandsafhankelijk uit te voeren dient er een goede toestandsindicator te zijn. Dit is de informatiebehoefte over de bodemhoogte. Er is echter nog geen goed model waarmee het bodemverloop in de Maasgeul nauwkeurig voorspeld kan worden.

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

Het loden wordt per keer over een groot deel van de geul gedaan. De onderhoudsstrategie moet daarom op een groot deel van de geul toepasbaar zijn. Het gekozen onderzoeksgebied is echter niet representatief voor een groter deel van de Maasgeul. De uitkomsten uit het model zijn hierdoor niet representatief voor het onderhoud aan een groter deel van de geul.

De resultaten zijn erg gevoelig voor het verloop van de werkelijke bodemhoogte. Een betere beschrijving van het bodemverloop kan de marge in de resultaten sterk verlagen.

De kosten van het baggeren zijn in het model alleen afhankelijk van de gebaggerde hoeveelheid. Omdat de baggerprijs in het model voor ieder scenario constant is verondersteld, zijn de verschillen in kosten tussen de scenario's niet groot. In werkelijkheid is de prijs van het baggeren door vele factoren bepaald. Een betere beschrijving van de baggerkosten kan een duidelijker onderscheid tussen de scenario's in kosten opleveren.

In het onderzoeksgebied wordt meer gebaggerd dan in het overige deel van de geul, waardoor de onderhoudskosten voor dit deel van de geul worden gedomineerd door de kosten voor het baggeren.

Er is nog geen goed model waarmee het bodemverloop in de Maasgeul nauwkeurig voorspeld kan worden. Daardoor is het niet goed mogelijk om geheel toestandsafhankelijk onderhoud uit te voeren. De strategie zal daarom binnen het huidige scenario van toestandsafhankelijk baggeren en periodiek loden moeten passen. Binnen het huidige onderhoud biedt het halveren van de loodfrequentie in combinatie met het vergroten van de baggermarge het meeste perspectief om besparingen in het onderhoud te realiseren.

Geheel periodiek onderhoud is geen goed alternatief voor het huidige onderhoud. Om de overschrijdingskans te beperken moeten meer ingrepen plaats vinden dan noodzakelijk. Hierdoor worden overbodige kosten gemaakt waardoor dit onderhoud geen goed alternatief biedt.

8.2 Aanbevelingen

Naast de conclusies zijn er ook aanbevelingen geformuleerd. De aanbevelingen zijn in twee groepen te verdelen. Eerst worden er aanbevelingen voor verdere modellering van het onderhoud gegeven en vervolgens zullen er enkele algemene aanbevelingen worden gegeven.

Het is belangrijk dat het gekozen onderzoeksgebied representatief is voor het gedeelte van de geul waar het onderhoud voor wordt gemodelleerd. Bij een grote ruimtelijke spreiding van de sedimentatie zal het onderzoeksgebied ook groot moeten zijn. Als het onderzoeksgebied te klein wordt gekozen wordt er geen goede strategie bepaald. Dit komt omdat er in het overige deel van de geul meer of minder gebaggerd moet worden.

Bij een klein onderzoeksgebied kan de sedimentatie beter beschreven worden waardoor de onzekerheden kleiner zijn. Omdat de resultaten erg gevoelig blijken voor het verloop van de sedimentatie is een klein onderzoeksgebied aan te bevelen.

De kosten van baggeren moeten verder gespecificeerd worden. Constant baggeren met een kleine capaciteit zal een andere baggerprijs hebben dan één keer baggeren met een grote capaciteit. Om de verschillende scenario's goed tegen elkaar af te kunnen wegen zullen de kosten van het baggeren voor ieder scenario apart bepaald moeten worden.

Er dient meer onderzoek gedaan te worden naar de sedimentatie in de geul. Een betere beschrijving van de sedimentatie kan de onzekerheden in het model verlagen.

Een vergroting van de baggermarge betekent dat de Maasgeul gemiddeld structureel dieper zal zijn. Wat de gevolgen hiervan zijn voor het sedimentatiepatroon in het overige deel van de geul zal onderzocht moeten worden.

Om in de toekomst het onderhoud, en in het bijzonder het loden, toestandsafhankelijk te kunnen uitvoeren zal er een goede voorspelling van de bodemhoogte gemaakt moeten worden. Hiervoor is het van belang dat er meer onderzoek wordt gedaan naar de sedimentatie in de geul. Hoe nauwkeuriger het bodemverloop beschreven kan worden des te minder lodingen er nodig zijn.

De tijpoorten worden berekend aan de hand van de nautisch gegarandeerde diepte. De eventueel aanwezige overdiepte wordt niet gebruikt voor het verruimen van de tijpoorten. Met een goede voorspelling van de bodemhoogte kan de overdiepte gebruikt worden voor het verruimen van de tijpoorten. Een grotere baggermarge zal dan ook een verruiming van de tijpoorten betekenen.

Onderzoek naar uitbesteding van het gehele onderhoud. Er moet nu gelood worden om na de baggeringrepen te diepgang te controleren. Als een baggeronderneming de diepgang moet garanderen kan er ook gebruik gemaakt worden van de nauwkeurigheid van de diepgang van een baggeringreep.

De uitgevoerde baggerwerkzaamheden moeten beter gecontroleerd en gedocumenteerd worden. Meer informatie over de het verloop van de bodemgroei en de uitgevoerde baggerwerkzaamheden zal leiden tot een betere voorspelling van de bodemhoogte en een efficiënter vaargeulbeheer.

Literatuur

Dekker, R en van Noortwijk, J.M. “Modellen voor het optimaliseren van onderhoud” [Models for optimisation of maintenance]. In Risicoanalyse en bedrijfszekerheid, pagina’s 16-21, Nederlandse Vereniging voor Risicoanalyse en Bedrijfszekerheid (NVRB), 2000.

Dekker, R en van Noortwijk., J.M. “Beslissingsondersteuning voor civiel onderhoud.” [Decision support for civil maintenance]. In Bedrijfskunde, 73(2) pagina’s 6-17, 2001.

Feller, W. “An Introduction to Probability Theory and its Applications.” Volume 1. New York: John Wiley & Sons, 1950.

GBV, “De Mont van de Maes, Wijde Maasmonding werd Europeoort”. Gemeentelijk Bureau Voorlichting en publiciteit, Stadhuis, Rotterdam.

Gits, C.W. “On the maintenance concept for a technical system: a framework for design.” In Maintenance Management International, vol. 6, pagina’s 129-146, 181-196, 223-237, 1986.

Klatter, H.E. en van Noortwijk, J..M. “Optimal Inspection Decisions for the Block Mats of the Eastern-Scheldt Barrier”. Reliability Engineering and System Safety, 65(3):203-211, 1999.

Karlin, S. en Taylor, H.M. “A First Course in Stochastic Processes.” Second Edition. San Diego: Academic Press, 1975.

Management International, vol. 6, pagina’s 129-146, 181-196, 223-237, 1986.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (Hoofddirectie Financieel Economische Zaken), Ministerie van Financiën, Centraal Planbureau, RebelGroup. “Aanvulling op de leidraad OEI”. December 2004.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat,
http://www.noordzee.org/goede_vaarwegen, 13-07-2005.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat Directie Noordzee. “Dieptemeting (een jaar op pad met het multibeam echolood)”. 1992

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat Directie Noordzee. “Kengetallen Maritieme Veiligheid.” Maart 2004.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat Directie Noordzee. “Optimalisatie en management van het civiel-technisch beheer van de vaargeulen naar Rotterdam en IJmuiden.” Augustus 1990.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat Directie Noordzee. "Project Financieel NZ1230 totaal 1." Versie November 2004.

MTI. "Instandhoudingsplan bodem Vaarroute naar Rotterdam." Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat. 27 Mei 2003.

NOS, het NOS journaal van 30 december 2004.

Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC) en International Association of Ports and Harbors (IAPH). "Approach Channels, a guide for design." April 1995.

Poortema, K. "Statistiek I voor CT&M." Dictaatnummer 545 van de Universiteit Twente, faculteit der toegepaste wiskunde, Mei 2000.

Rausand, M. & J. Vatn. "Reliability Centred Maintenance." In C.G. Soares (ed.), Risk and Reliability in Marine Technology, Balkema, Holland, 1996.

Rijksinstituut voor Kust en Zee. "Optimalisatie en management van het civieltechnisch beheer van de vaargeulen naar Rotterdam en IJmuiden." Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat Directie Noordzee. Augustus 1990.

Ross, S.M. "Applied probability models with optimization applications." New York: Dover Publications, 1970.

Smith, A.M. "Reliability Centred Maintenance." McGraw-Hill, inc. New York, 1993.
Titel: De haven van Rotterdam en de deltawerken

Tubbing, E. TU Delft, afdeling SSOR. Beschrijving van de procesgang Loden – Hydro meteo –Baggeren t.b.v. het vaargeulbeheer, m.b.v. de activity factor methode. Oktober 1988.

Van Noortwijk, J.M. "Cost-based criteria for obtaining optimal design decisions." In R.B. Corotis, G.I. Schuëller, and M. Shinozuka, editors, Structural Safety and Reliability; Proceedings of the Eighth International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR), Newport Beach, California, U.S.A., 17-22 June 2001. Lisse: Balkema, 2001.

Van Noortwijk, J.M. "Onderhoudsoptimalisatie" [Maintenance optimisation]. In Kansen in de civiele techniek; Deel 2: Voorbeelden uit de praktijk [Probabilities in civil engineering; Volume 2: Examples from practice], Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research & Regelgeving (CUR) and Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde & Bouwdienst, CUR-publicatie 209, pages 179-195. Gouda: CUR, 2002.

Van Noortwijk, J.M. en Frangopol, D.M. "Deterioration and maintenance models for insuring safety of civil infrastructures at lowest life-cycle cost." In D.M. Frangopol, E.



Brühwiler, M.H. Faber, and B. Adey, editors, Life-Cycle Performance of Deteriorating Structures: Assessment, Design and Management, pagina's 384-391. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2004.

Van Noortwijk, J.M. en Kallen, M.J. "Inspection and maintenance decisions based on imperfect inspections." In T. Bedford and P.H.A.J.M. van Gelder, editors, Safety and Reliability, Proceedings of ESREL 2003 - European Safety and Reliability Conference 2003, 15-18 June 2003, Maastricht, The Netherlands, pages 873-880. Lisse: Swets & Zeitlinger, 2003.

Wagner, Harvey .M. "Principles of Operations Research; Second Edition". Englewood Cliffs, NJ. Hoofdstuk 11: Prentice-Hall, 1975

Woudenberg, van C. "Analyse van het Baggerbeslissingsproces". Rijkswaterstaat, 1994.

Mondelinge mededeling

Dierikx, Ben. Financieel medewerker meetdienst Rijkswaterstaat Directie Noordzee. Gesproken op 15-12-2004

Groelsch, Jean. Medewerker Rijkswaterstaat Directie Noordzee. Gesproken op 01-12-2004