

Erosie in natuurvriendelijke oevers

Een studie naar de erosieprocessen in ontsteende oevers van de Maas

Hogeschool Van Hall Larenstein

Grontmij Nederland B.V.
De Bilt, 6 juni 2012

Verantwoording

Titel : Erosie in natuurvriendelijke oevers

Subtitel : Een studie naar erosieprocessen in de ontsteende oevers van de Maas

Datum : 6 juni 2012

Auteur(s) : M.G.C. (Martijn) Marijs

E-mail adres : martijn.marijs@wur.nl

Begeleiding Grontmij : Claus Kruijt

Begeleiding Hogeschool van Hall Larenstein : Harrie van Rosmalen

Voorwoord

Voor u ligt mijn afstudeerrapport geschreven als afsluiting van mijn opleiding Land en Watermanagement aan Hogeschool Van Hall-Larenstein. Mijn interesse voor het onderwerp erosie in grote rivieren is gewekt tijdens het zoeken naar een stage in het buitenland. Ik ben toen in contact gekomen met een aantal loges in Zambia aan de Zambezi rivier, die bedreigd werden door een oprukkende rivier. Helaas is die stage niet doorgegaan, maar is wel mijn interesse voor het onderwerp oevererosie gewekt. Ik ben daarom erg blij mee dat Grontmij mij de mogelijkheid heeft verschaft om onderzoek te doen naar het onderwerp oevererosie. Hoewel de Nederlandse situatie compleet anders is als de buitenlandse situatie, heeft dit onderzoek mij veel inzicht verschaft in de erosieprocessen, welke uiteindelijk overal hetzelfde zijn. Ik wil daarom ook erg mijn collega's bij Grontmij bedanken. En in het bijzonder mijn begeleiders Claus Kruijt als directe begeleider, en Sander Vos die mij erg goed geholpen heeft om een goed rapport neer te zetten. Ik waardeer de vrijheid die ze mij hebben gegeven, en hun geduld om al mijn vragen te beantwoorden. Daarnaast wil ik ook al mijn docenten van Hogeschool van Hall-Larenstein bedanken, voor hun colleges van de afgelopen jaren. En in het bijzonder wil ik Harrie van Rosmalen bedanken voor zijn begeleiding van mijn afstudeerproject.

Veel plezier met het lezen van dit rapport.

De Bilt, 6-6-2012

Samenvatting

In dit rapport wordt ingegaan op de erosie in natuurvriendelijke oevers van de Maas. Om inzicht te verkrijgen in de hoeveelheid erosie, is de hoeveelheid erosie berekend met behulp van twee modellen, het door Deltaris ontwikkelde Bank Erosion Model (BEM), en het in de Verenigde Staten ontwikkelde Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM). Deze modellen berekenen de erosie ten gevolge van verschillende belastingen. BEM berekent de erosie ten gevolge van scheepsgolven, en BSTEM berekent de erosie ten gevolge van stroming.

Voor de tests is gekozen om gebruik te maken van de afvoer- en oevergegevens van rivierkilometer 171 van de Maas. Op deze locatie vindt erosie plaats, en zijn er gegevens beschikbaar: waterstand en debietmetingen, metingen van het dwarsprofiel en gegevens over het aantal scheepsbewegingen.

Om de belasting op de oever te kunnen berekenen is gebruik gemaakt van afvoergegevens, de waterstand en het debiet. Om te kunnen rekenen met verschillende data is gebruik gemaakt van twee afvoerreeksen. De afvoerreeks van 2002, een hoogwaterperiode met een herhalingskans van eens per 20 jaar. En de afvoerreeks van 2008, een hoogwaterperiode met een herhalingskans van een keer per jaar.

Voor de berekeningen met het BEM model zijn de twee afvoerreeksen samengevoegd tot één afvoerreeks, omdat het BEM model met maar één afvoerreeks kan rekenen. Er is ervoor gekozen om de hoogwaterperiode uit de afvoerreeks van 2002 in de afvoerreeks van 2008 te plakken, en om op deze manier een afvoerreeks te maken met daarin twee hoogwaterperiodes. De gebruikte gegevens voor het aantal scheepspassages zijn afgeleid uit het aantal scheepspassages bij de stuw Grave, en komt uit op 8876 passages van volle binnenvaartschepen.

Voor de berekeningen gebruikt het BSTEM model hoogwaterperiodes, in plaats van complete afvoerreeksen. Er is gebruik gemaakt van de hoogwaterperiodes met een herhalingstijd van eens per jaar, en een hoogwaterperiode met een herhalingstijd van eens per 20 jaar. Om daarnaast nog een indruk te kunnen geven van wat de erosie zal zijn tijdens een extreme hoogwaterperiode zijn ook nog berekeningen gedaan met een hoogwaterperiode met een herhalingskans van eens per 1250 jaar.

De uitgevoerde berekeningen met BEM en BSTEM zijn gedaan voor een groot aantal verschillende bodemtypen, en kunnen daarom een indruk geven van de erosie in verschillende bodemtypen, en hoe deze zich tot elkaar verhouden. Naast de variatie in bodemtypen is ook de erosie berekend waarbij er een oeverbescherming gesimuleerd is. Er is berekend wat het effect is van het laten doorlopen van de oeverbescherming tot boven het waterniveau op de snelheid van de erosie.

Uit de gemaakte berekeningen is naar voren gekomen dat de voornaamste factor van erosie de golfslag is. Uit de berekeningen komt naar voren dat de erosie door golfslag voor een situatie met een zandige bodem na 10 jaar 21 meter kan zijn, de bijbehorende erosie door stroming tijdens een hoogwatergebeurtenis met een herhalingstijd van eens per 20 jaar maar 2 meter is.

Het effect van het toepassen van meer oeverbescherming is voornamelijk zichtbaar bij erosie door golfslag. Uit de berekeningen is naar voren gekomen dat afhankelijk van het oevermateriaal er een reductie van 30 tot 55% erosie bewerkstelligd kan worden door het laten doorlopen van de oeverbescherming tot het stuwpeil van de rivier.

Inhoudsopgave

VOORWOORD	3
SAMENVATTING.....	4
INHOUDSOPGAVE	5
1 INLEIDING.....	7
1.1 KADER EN AANLEIDING	7
1.2 PROBLEEMBESCHRIJVING	7
1.3 HOOFD – EN DEELVRAGEN	7
• HOOFDVRAAG	7
• DEELVRAGEN.....	7
1.4 DOELGROEP	8
1.5 LEESWIJZER	8
2 KEUZE STUDIEGEBIED	9
2.1 MOGELIJKE LOCATIES	9
2.2 LOCATIES MET MONITORING.....	10
3 THEORETISCHE ACHTERGROND	13
3.1 OEVEREROSIE, NATUURLIJKE PROCESSEN	13
3.2 EFFECT VAN OEVERBESCHERMING.....	13
3.3 EROSIESNELHEID	13
3.4 EROSIE TEN GEVOLGE VAN STROMING.....	14
3.5 EROSIE TEN GEVOLGE VAN GOLFSLAG	15
3.6 CORRECTIEFACTOREN	16
3.7 EXTERNE EROSIE FACTOREN	17
3.8 CONCLUSIE	17
4 BEPALEN EROSIESNELHEID	18
4.1 EROSIE/AFSLAGMODELLEN	18
4.2 BEPALEN VAN DE GROOTTE VAN DE GEBRUIKTE TIJDSTAP	19
4.3 WANNEER VINDT ER EROSIE PLAATS?	19
4.4 SCHEEPSGOLVEN OP DE OEVER.	21
4.5 BEGINWAARDE EROSIE DOOR GOLVEN.	21
4.6 EROSIE DOOR EEN HOOGWATERGEBEURTENIS.	21
5 BEREKENINGEN BEM	22
5.1 VASTE EIGENSCHAPPEN OEVER	22
5.2 VARIABELE EIGENSCHAPPEN OEVER	23
5.3 UITGEVOERDE BEREKENINGEN.	23
5.4 CONCLUSIE	25
6 BEREKENINGEN BSTEM.....	26
6.1 REKENREEKSEN	26
6.2 VASTE EIGENSCHAPPEN OEVER	27
6.3 TESTEN BSTEM.....	27

6.4	CONCLUSIE	29
7	ANALYSE MODELRESULTATEN	30
7.1	WIJZIGINGEN IN EIGENSCHAPPEN	30
7.2	RELATIE BEM EN BSTEM	31
7.3	TOTALE EROSIE	32
7.4	CONCLUSIE	33
8	CONCLUSIE	34
8.1	HOOFDVRAAG	34
8.2	DEELVRAGEN	34
9	AANBEVELINGEN	36
9.1	KADER RICHTLIJN WATER	36
9.2	KALIBRATIE	36
9.3	SAMENVOEGEN GOLFSLAG EN STROMING	36
9.4	EROSIE BEPERKENDE MAATREGELEN	36
	BEGRIPPENLIJST	37
	BRONNENLIJST	39
	BRONNENLIJST	39
	AFBEELDINGEN	39
	GRAFIEKEN	40
	MODELLEN	40
	INTERNET BRONNEN	40

BIJLAGE 1: BESCHRIJVING OEVERTYPE 3 EN 4

BIJLAGE 2 SPREADSHEET "OEVERPARAMETERS"

BIJLAGE 3A: OEVEREROSIE TEN GEVOLGE VAN GOLVEN NA 10 HOOGWATERS.

BIJLAGE 3B: OEVEREROSIE TEN GEVOLGE VAN GOLVEN NA 2 JAAR.

BIJLAGE 3C: OEVEREROSIE TEN GEVOLGE VAN GOLVEN NA 1 JAAR.

BIJLAGE 4: EROSIE AFHANKELIJK VAN DE AFSTAND TUSSEN HET SCHIP EN DE OEVER.

BIJLAGE 5: EROSIE TEN GEVOLGE VAN STROMING, NAAR MATE VAN BESCHERMING.

BIJLAGE 6A: EROSIE TEN GEVOLGE VAN STROMING IN ZAND.

BIJLAGE 6B: EROSIE TEN GEVOLGE VAN STROMING IN ZWAKKE KLEI.

BIJLAGE 6C: EROSIE TEN GEVOLGE VAN STROMING IN MATIGE KLEI.

BIJLAGE 6D: EROSIE TEN GEVOLGE VAN STROMING IN MATIGE KLEI.

1 Inleiding

1.1 Kader en aanleiding

Sinds de jaren 60 en 70 zijn veel rivieroevers van de Maas vastgelegd met stortsteen, grind of zetsteen. Hierdoor lijkt de Maas in Nederland meer op een kanaal dan op een echte rivier. Sinds het in werking treden van de Kader Richtlijn Water (KRW)¹ is dit beeld onwenselijk. Als onderdeel van de maatregelen worden de laatste jaren oeverstroken opgekocht en steenbestortingen weggehaald. Het doel hierachter is het opnieuw laten ontstaan van de eens zo karakteristieke Maasoevers met bijbehorende strandjes en natuur. Momenteel zijn al langs een aantal trajecten de oevers ontsteend, waar ook al strandjes en natuur begint te ontstaan.

1.2 Probleembeschrijving

In opdracht van Rijkswaterstaat heeft Grontmij de plannen opgesteld voor het Project Natuurvriendelijke Oevers Maas en voor de natuurvriendelijke oevers langs de Maas. Tijdens de planstudie is notie gemaakt van objecten op de oevers, die niet beschadigd mogen worden door het afkalven van de oevers. Om de snelheid van de oevererosie te bepalen is gebruik gemaakt van zogeheten “expert judgement”. Hiermee is geprobeerd een inschatting te maken van de breedte van de oeverstrook die aangekocht moet worden, om plaats te kunnen bieden aan de erosie. Nu de oevers al meer dan een jaar opgeleverd zijn komt Rijkswaterstaat erachter dat de hoeveelheid erosie groter is dan verwacht. Hierbij rijzen twee vragen op, hoe het komt dat de erosiesnelheid hoger is dan verwacht, en wat zijn de mogelijke oplossingen om de erosie(snelheid) te beperken of te stoppen. Grontmij heeft besloten om onderzoek te doen naar de relatie tussen de mate van ontstening, e.g. tot op welk niveau er nog steen blijft zitten, en wat is de hoeveelheid erosie. Daarnaast wordt er gekeken naar de mogelijke oplossingen om erosie tegen te gaan maar zonder de dynamiek in de oever te verliezen.

1.3 Hoofd – en deelvragen

- **Hoofdvraag**
 - Wat is de relatie tussen de mate van ontstening van rivieroevers, en de erosiesnelheid?
- **Deelvragen**
 - Welke processen zitten achter de oevererosie?
 - Op welke locaties is momenteel vrije oevererosie gaande?
 - Hoe snel gaat de oevererosie in een onbeschermde oever
 - Welke oplossingen zijn beschikbaar voor het tegengaan van oevererosie
 - Zijn de erosiebeperkende maatregelen, en de methode voor het berekenen van de erosiesnelheid breder te gebruiken dan alleen bij de onderzochte locaties?

¹ <http://bit.ly/KaderRichtlijnWater>

1.4 Doelgroep

Dit rapport is geschreven voor adviseurs en beleidsmakers die te maken hebben met de ontstening van rivieroevers. Het rapport is bedoeld om een extra handvat te geven in het bepalen van de omvang van de erosie in de oeverzone.

1.5 Leeswijzer

Dit rapport bestaat uit drie delen, het hoofdrapport, de bijlagen en een Cd-rom. De bijlagen zijn een integraal deel van het hoofdrapport, een groot deel van de gebruikte grafieken zijn alleen toegankelijk in de bijlagen. De bijlagen zijn daarom als een los document bijgevoegd. De Cd-rom een digitale kopie van het hoofdrapport, de bijlagen, en de gebruikte modellen.

Het hoofdrapport is ingedeeld in vijf delen: de gebiedsstudie, de theoretische achtergrond, de keuze voor de modellen, het gebruik van de modellen, en een analyse van de resultaten. In hoofdstuk 2 wordt de gebiedsstudie behandeld, hier wordt uitgelegd waarom rivierkilometer 171 gekozen is als modelgebied. In hoofdstuk 3 wordt uitgelegd welke processen invloed hebben op het erosieproces. Deze processen worden in dit hoofdstuk puur theoretisch beschreven.

In hoofdstuk 4 wordt uitgelegd waarom er voor gekozen is om met modellen te werken, en wordt uitgelegd met welke modellen er gerekend wordt. Tevens wordt hier een toelichting gegeven op de inputgegevens van het model, de gebruikte afvoerreeksen en de grootte van de gebruikte tijdstappen.

In hoofdstuk 5 en 6 worden de gemaakte berekeningen met de gekozen modellen beschreven. In hoofdstuk 7 worden de resultaten van deze berekeningen geanalyseerd, en wordt beschreven wat de erosie zal zijn, bij verschillende situaties.

De conclusie en aanbevelingen staan in hoofdstuk 8 en 9. Hierin worden de antwoorden op de hoofd- en deelvragen gegeven, en aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek.

Achter in het rapport is een lijst met begrippen te vinden, hierin is tevens een afbeelding opgenomen waarin de gebruikte termen voor de oever toegelicht wordt. In het rapport vindt u zogeheten Bit.ly webadressen. Deze "links" zijn verkortingen van langere webadressen. In het geval dat de website die deze service levert is in de bronnenlijst het volledige webadres opgenomen.

2 Keuze studiegebied

Om de hoofd- en deelvragen op te kunnen beantwoorden dient een gebied gekozen te worden waar recentelijk de oever ontsteent is, en waar er zichtbaar erosie op treedt. Er is ervoor gekozen om hierbij een gebied te kiezen in een recht traject van de rivier, omdat in de rechtstand geen invloed is van de zogeheten “helical flow” (hoofdstuk 3.4). In deze sectie moeten de waterstanden en afvoeren bekend zijn. Daarnaast moet er informatie beschikbaar zijn over het aantal scheepsbewegingen. De gekozen sectie wordt dan doorgerekend.

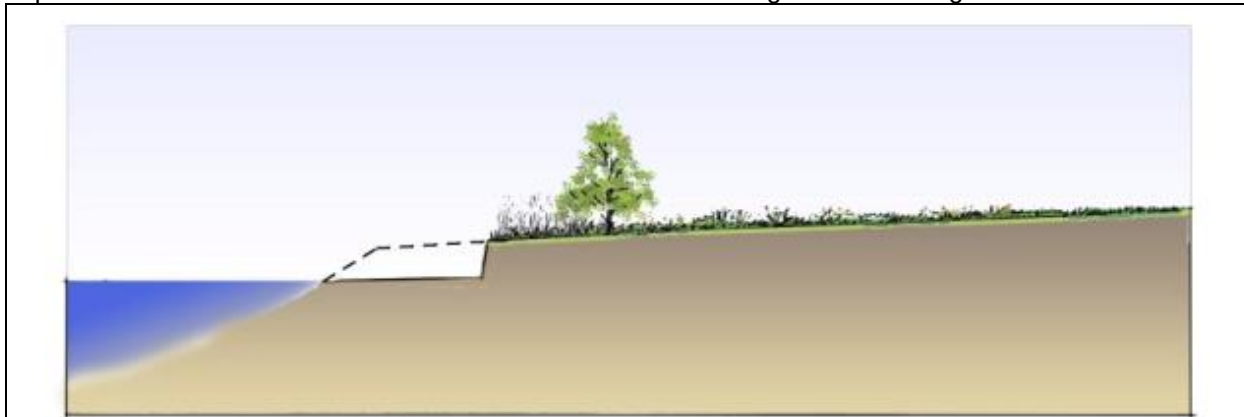
2.1 Mogelijke locaties

Om verschillende locaties te kunnen filteren is eerst gekeken naar waar er tot nu toe oevers ontsteent zijn voor het project NVO Maas (natuurvriendelijke oevers Maas). In tabel 1 is een samenvatting van deze trajecten te vinden

Naam project	oever	kilometrerings		Lengte	ontwerp optie	Trajecttype
		van	tot			
NVO cluster 11	R	149.8	150.2	400	1	Binnenbocht
NVO cluster 11	R	150.4	151.3	900	1	Binnenbocht
NVO cluster 1	L	151.9	152.9	1000	1	Rechtstand
NVO cluster 12	R	154.1	154.6	500	1	Rechtstand
NVO cluster 3	L	161.1	161.6	500	3	Buitenbocht
NVO cluster 15	R	166.2	167.5	1300	1	Buitenbocht
NVO cluster 5	L	168.6	171	2400	2	Binnenbocht
NVO cluster 16	R	170.9	174.2	3300	2	Rechtstand
NVO cluster 6	L	171.1	172.5	1400	2	Rechtstand
NVO cluster 8	L	175.1	175.3	200	3	Rechtstand
NVO Cluster 10	R	201.9	204	2100	1	Binnenbocht
NVO Cluster 1	L	202.9	203.4	500	1	Binnenbocht
NVO Cluster 1	L	204	205.7	1700	2	Binnenbocht
NVO Cluster 11	R	204.2	204.7	500	3	Buitenbocht
NVO Cluster 12	R	205.2	205.5	300	3	Rechtstand
NVO Cluster 2	L	205.8	209.2	3400	2	Rechtstand
NVO Cluster 13	R	206.8	207.1	300	1	Rechtstand
NVO Cluster 15	R	211.8	213.4	1600	2	Binnenbocht
NVO Cluster 5	L	216.6	216.9	300	1	Rechtstand
NVO Cluster 16	R	217.5	218.5	1000	1	Binnenbocht
NVO Cluster 16	R	218.5	218.87	370	1	Binnenbocht
NVO Cluster 8	L	220.9	221.2	300	1	Rechtstand
NVO Cluster 17	R	222.5	223.5	1000	1	Buitenbocht
NVO Cluster 18	R	224.5	224.7	200	1	Rechtstand
NVO Cluster 18	R	225.8	226.5	700	1a	Rechtstand

Tabel 1: Samenvatting projecten NVO Maas.

In tabel 1 wordt gesproken van zogeheten ontwerp opties, dit zijn de verschillende ontwerpen die momenteel gebruikt worden als ontwerp voor de natuurvriendelijke oevers. Van deze opties zijn optie 1 en 2 voor dit onderzoek van belang. Optie 1 is het weghalen van de gehele oeverbescherming, en optie 2 is het laten zitten van een deel van de oeverbescherming. Zie afbeelding 1 en 2.



afbeelding 1: Inrichtingsoptie 1 het verwijderen van de gehele oeverbescherming.



afbeelding 2: Inrichtingsoptie 2 het verwijderen van de stortsteen tot stuwpeil.

Opties 3 en 4 zijn voor dit onderzoek niet van belang. Deze opties betreffen het inrichten van de oever, zonder ruimte te laten voor vrije oever erosie (zie bijlage 1). Omdat in dit rapport wordt gekeken naar oevererosie in beschermde oevers zijn de oevers ingericht volgens inrichtingsoptie 1 ook niet geschikt. Omdat opties 1, 3 en 4 niet geschikt blijken te zijn blijven alleen de oevers over waarbij inrichtingsoptie 2 wordt gebruikt. (zie tabel 2).

Naam project	oever	kilometrerings		Lengte	ontwerp optie	Trajecttype
		van	tot			
NVO cluster 5	L	168.6	171	2400	2	Binnenbocht
NVO cluster 16	R	170.9	174.2	3300	2	Rechtstand
NVO cluster 6	L	171.1	172.5	1400	2	Rechtstand
NVO Cluster 1	L	204	205.7	1700	2	Binnenbocht
NVO Cluster 2	L	205.8	209.2	3400	2	Rechtstand
NVO Cluster 15	R	211.8	213.4	1600	2	Binnenbocht

Tabel 2: Selectie met mogelijke trajectkeuzes.

2.2 Locaties met monitoring

Rijkswaterstaat heeft sinds 2009 jaarlijks een aantal locaties ingemeten waar momenteel erosie plaats vindt. Op deze locaties zijn jaarlijks de oorsprong van de steilwand, de waterbodem, het maaiveld en het strandje ingemeten. In tabel 3 is een selectie van deze locaties weergegeven.

Nr.	Locatie	Km	Oever
10	Gebrande Kamp – Neerveld	158,3 – 159,1	Rechteroever
11	Coehoorn	170,9 – 174,3	Rechteroever
12	Balgoij	177,0 – 178,9	Rechteroever
13	Keentse Oevers	177,7 – 178,8	Linkeroever
14	Batenburgse Oevers	185,0 – 185,6	Rechteroever
15	Ossekamp (bij Oss)	193,3 – 194,8	Linkeroever
16	Het Scheel (bij Oijen)	195,4 – 196,5	Linkeroever
17	De Paaldere 't Wildt	209,1 – 213,3	Linkeroever
18	Zandmeren (bij Kerkdriel)	212,5 – 214,0	Rechteroever
19	Hedel – Casterens hoeve	217,9 – 218,1	Rechteroever

Tabel 3: Locaties met monitoring van de erosie.

Wanneer tabel 2 en 3 met elkaar vergeleken worden valt te zien dat NVO cluster 16 in tabel 2 en 3 voorkomt, en in een rechtstand ligt. NVO cluster 16 is ongeveer rivierkilometer 171. De oever op deze locatie is ingericht volgens optie 2. In afbeelding 3 is de locatie van rivier kilometer 171² weergegeven. In afbeelding 4 is een foto van deze locatie weergegeven, en in afbeelding 5 een dwarsdoorsnede van de rivier.

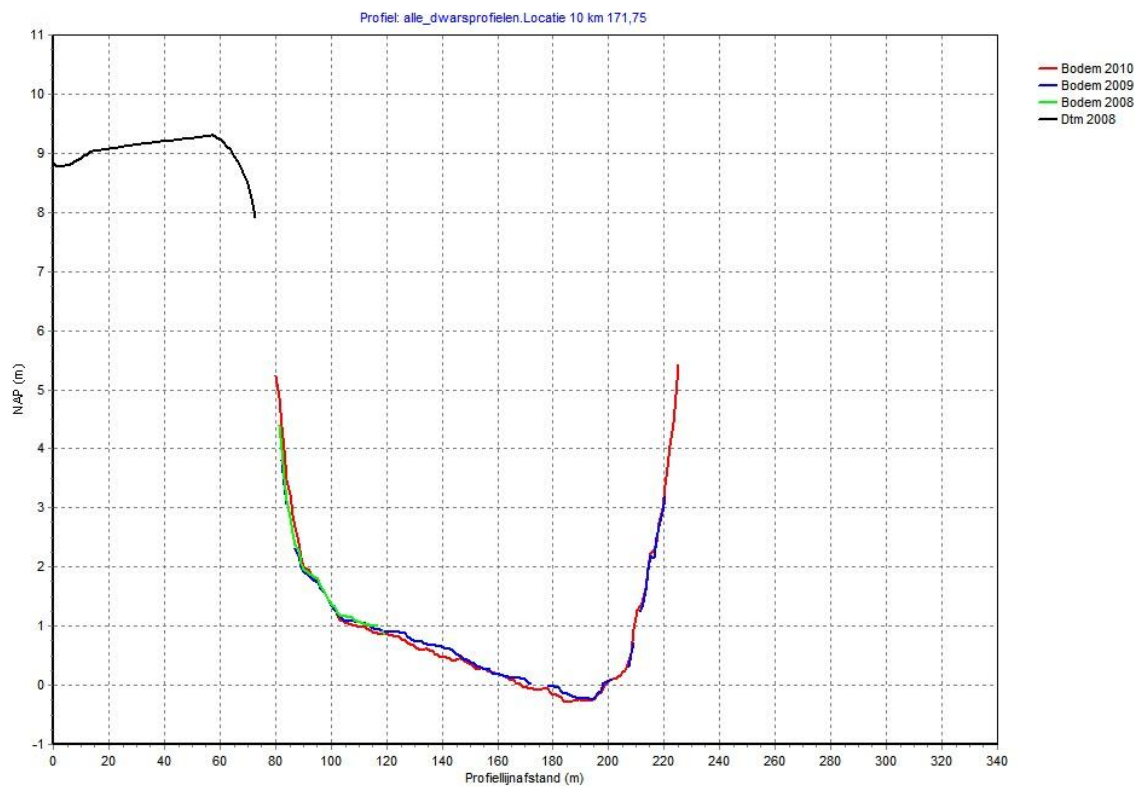


Afbeelding 3: Locatie studiegebied.

²Link naar de locatie in Google maps: <http://bit.ly/Rivierkilometer171>



Afbeelding 4: Foto rivierkilometer 171.



Abeelding 5: Dwarsdoorsnede rivierkilometer 171

3 Theoretische achtergrond

3.1 Oevererosie, natuurlijke processen

Oevererosie in grote rivieren bestaat grofweg uit drie processen, namelijk fluviatiele erosie, geomechanische instabiliteit en erosie door golfslag. Twee van deze processen worden beschreven door Alessandra Crosato (Alessandra Crosato, 2008), namelijk de fluviatiele erosie en de Geomechanische instabiliteit. Het fluviatiele erosie proces betreft het meevoeren van gronddeeltjes door de stroming van het water. Wanneer de krachten resulterend uit de stroming een bepaalde waarde overschrijdt zullen bodemdeeltjes in suspensie komen, en zal de oever eroderen. Ook door golfslag kan het bodemmateriaal in suspensie komen. Hoewel dit een apart proces is, is de theorie achter de erosie hetzelfde als bij de erosie door stroming.

Geomechanische erosie vindt voornamelijk plaats bij steilwanden in samenhangende grond, en deze vorm van erosie zorgt voor massa afbraak van de steilwand. Deze afbraak vindt plaats wanneer de steilwand te steil of te hoog is, of ondermijnd wordt door erosie aan de teen van de steilwand. Het materiaal wat hierbij los komt, komt terecht op de rivierbodem aan voet van de oever. Hier kan het materiaal een buffer vormen welke de oever kan verstevigen. Het afvoeren van dit materiaal door de rivier wordt "basal clean-out" (Wood et al, 2001) genoemd. De oevererosie wordt vertraagd wanneer de basal clean-out traag verloopt, omdat eerst het bezwaken materiaal weggevoerd moet worden voordat er weer erosie aan de teen kan plaats vinden.

3.2 Effect van oeverbescherming

Bij een onbeschermd talud (zie ook afbeelding 1) kan erosie in beginsel onbeperkt doorgaan, mits er geen veranderingen optreden in de stroomsnelheden langs het talud. Van invloed op de stroomsnelheid zijn onder andere het profiel van de oever en het verhang van de rivier. Naast dat het profiel van de oever invloed uitoefent op de stroomsnelheid, beïnvloed het profiel ook de erosie door een massa-bezwijking. Wanneer de rivier erg diep is vlak langs de oever, zal materiaal wat door een massa-bezwijking in de rivier terecht komt sneller weggevoerd worden dan wanneer het materiaal in een relatief ondiep deel van de rivier terecht komt.

Bij een beschermd talud zal de erosie plaatsvinden boven de aangebrachte of bestaande bescherming. (zie ook afbeelding 2). Wanneer er vanuit gegaan wordt dat er geen schade op treedt aan de bescherming, zal zich na verloop van tijd een evenwichtssituatie in stellen. Dit evenwichtprofiel zal nog steeds eroderen, bijvoorbeeld tijdens een hoogwaterperiode, maar minder dan normaal. Bij een massa bezwijking zal materiaal in een relatief ondiep profiel terecht komen, waardoor de erosiesnelheid trager verloopt als bij een oever met een dieper profiel.

3.3 Erosiesnelheid

Om de te kunnen bepalen hoeveel erosie er op treedt is het van belang eerst te bepalen onder welke voorwaarde de erosie optreedt, en daarna wat de erosiesnelheid is. De berekening van de erosiesnelheid is verschillend in verschillende bodemsoorten. Samenhangende bodems kennen een andere berekeningsmethode dan onsamenshangende bodems (puur zand of grind zonder toevoegingen). Omdat in Nederland voornamelijk samenhangende bodems voorkomen (bijvoorbeeld zand met een bijmenging van klei of leem, of puur klei of leem) wordt alleen de berekening voor samenhangende bodems beschreven.

Bij samenhangende bodems, bodems met een deel klei of leem, is de erosiesnelheid goed te berekenen. Partheniades (Partheniades, 1965) heeft een relatie opgesteld tussen de erosiesnelheid v (m/s), en de schuifspanning op de oever ten gevolge van de door het water (τ_w). Voordat erosie plaats vindt zal eerst de τ_w groter moeten zijn dan de kritische schuifspanning van de oever (τ_{cr}). Uiteindelijk kan de erosiesnelheid v berekend worden met:

$$v = E \left(\frac{\tau_w - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \right)$$

Waarbij:

v	=	Erosiesnelheid van de oever in horizontale richting	(m/s)
E	=	Coëfficiënt voor de gevoeligheid voor erosie (afkalfsterkte)	(m/s)
τ_{cr}	=	Kritische schuifspanning van het materiaal	(Pa)
τ_w	=	Schuifspanning ten gevolge van de stroming	(Pa)

Met als conditie dat $\tau_w > \tau_{cr}$.

Waarbij:

$$E = \frac{\tau_{cr}}{10D_{60}(1+P)} \frac{C_v}{C_u}$$

C_u	=	ongedraineerde schuifspanning	(Pa)
C_v	=	consolidatie coëfficiënt	(m ² /s)
D_{60}	=	Diameter die door 40% van het oever materiaal wordt overschreden (m)	
P	=	Porositeit van het materiaal	(-)
τ_{cr}	=	Kritische schuifspanning	Pa

De kritische schuifspanning kan bepaald worden door gebruik te maken van de Atterberg limieten (Lee K L Seed H B., 1967) met de correlatie: $\tau_{cr} = 0.0034PI^{0.84}$ waarbij PI de plasticiteitindex is. De plasticiteitindex is het verschil in vochtpercentage tussen de vloeigrens en de uitrolgrens van een bodemonster. Waarbij de vloeigrens en de uitrolgrens bepaald worden met behulp van proef 15: Plasticiteit van grond volgens de standaard RAW Bepalingen (CROW, 2010).

Aan de hand van de coëfficiënt voor de gevoeligheid voor erosie (E of afkalfsterkte) kan, om het overzicht te bewaren, het bodemmateriaal worden ingedeeld in een aantal verschillende klassen. Deze klassen zijn gekozen zodat ze overeen komen met de veel in Nederland voorkomende grondsoorten, en kunnen onderverdeeld worden in de in tabel 4 genoemde klassen.

Ondergrens E- waarde	Bovengrens E – waarde	Omschrijving materiaal
0.001	--	Zand
0.00028	0.001	Slecht erosiebestendige klei
0.00015	0.00028	Matig erosiebestendige klei
0.00006	0.00028	Goed erosiebestendige klei
0	0.00006	Stevige klei

Tabel 4: Klassenindeling bodem naar afkalfsterkte.

3.4 Erosie ten gevolge van stroming

De schuifspanning uitgeoefend op rivieroever is afhankelijk van de stroming en golfslag langs de oever. Deze schuifspanning is opgebouwd uit een aantal factoren: de normale laterale stroming, golfslag en de "helical flow" (spiraalvormige stroming). Deze helical flow is afhankelijk van de geometrie van de rivier. Doordat er gekozen is voor een recht traject van de Maas heeft de helical flow geen invloed op de stroomsnelheid.

De schuifspanning ten gevolge van golven en stroming laten zich wel gemakkelijk modelleren, met behulp van de Von Karmann constante $\kappa \approx 0.4$ en de methode volgens Bijker (Bijker, 1967) waarbij $\tau_w = \rho \kappa^2 u_r^2$.

$$\text{En } u_r = \sqrt{\frac{g}{\kappa^2 C^2} u_c^2 + \frac{c_f}{2\kappa^2} u_b^2 \sin(\omega t)^2 + 2 \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} u_c \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{c_f}{2}} u_b \sin(\omega t) \sin(\phi)}$$

ω	=	hoekfrequentie golven = $2\pi/T$	(1/s)
T	=	Golfperiode	(s)
t	=	tijd	(s)
g	=	Gravatieversnelling	(m/s ²)
C	=	Chezy waarde	(-)
c_f	=	wrijvingscoëfficiënt (tussen stroming en oever)	(-)
ρ	=	massa water	(kg/m ³)
u_c	=	Laterale stroomsnelheid	(m/s)
u_b	=	bodemsnelheid	(m/s)
u_r	=	resulterende snelheid met golven en stroming	(m/s)
κ	=	Von Karmann constante	-

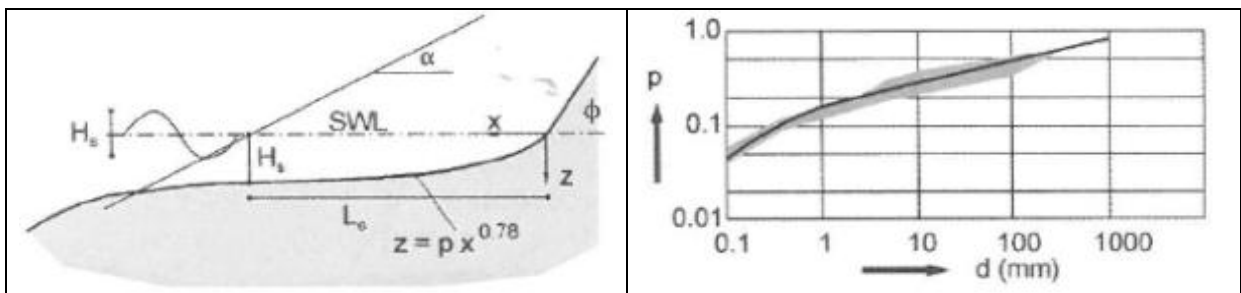
Wanneer in deze formule de factor van de golfslag weggelaten wordt, blijft over: $u_r = \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} u_c$

De berekende τ_w kan gebruikt worden om de erosiesnelheid te bepalen zoals genoemd in hoofdstuk 3.3.

3.5 Erosie ten gevolge van golfslag

Golfslag is een continue belasting op de oever. Op de Nederlandse rivieren zijn over het algemeen scheepsgolven maatgevend. Onder normale omstandigheden krijgen windgolven, door een korte strijklengte, niet de kans zich te ontwikkelen tot golven die schade kunnen veroorzaken aan de oever

Onder invloed van golven zal zich na verloop van tijd een evenwichtsprofiel instellen (afbeelding 6). De vorm van dit profiel kan worden benaderd met behulp van: $z = px^{0.78}$ (Vellinga, 1986) waarbij p afgelezen kan worden uit grafiek 1 (Vellinga, 1986). Of berekend kan worden met: $p = 0.39w^{0.44}$. Waarbij w de valsnelheid van de deeltjes is. En die is te berekenen met: $w = \frac{2(\rho_p - \rho_f)gr^2}{9\mu}$.



Afbeelding 6: Dwarsdoorsnede evenwichtsprofiel.

Grafiek 1: p Uitgezet tegen de d_{60} .

ρ_f	=	massa medium (water)	(kg/m ³)
ρ_p	=	absolute massa deeltje (zand)	(kg/m ³)
μ	=	viscositeit medium (water)	(Pa)

g	=	gravitatieversnelling	(m/s ²)
r	=	de radius van het vallende deeltje	(m)
H_s	=	golfhoogte	(m)
SWL	=	standard water line. Waterstand	(m +NAP)
α	=	hoek van de vooroever	(°)
ϕ	=	hoek van de steilwand	(°)
L_e	=	lengte erosie.	(m)
d	=	D ₆₀ niet cohesieve sedimentfactor oevermateriaal	(m)
p	=	Coëfficiënt voor een parabolisch strandje	(m ^{0.22})

Hierbij geldt: $Z < -H_s$

Wanneer nu de maximale erosielengte berekend moet worden (L_e) wordt de berekening:

$$L_e = \sqrt[0.78]{\frac{H_s}{p}}$$

Om schuifspanningen te bereken kan de methode volgens Bijker zoals omschreven in hoofdstuk 3.4 gebruikt worden.

Na het instellen van het evenwichtsprofiel zal er tijdens de normale waterstand geen erosie meer plaats vinden door golfslag. Wel zal er tijdens een hoogwaterperiode erosie op treden door golfslag, de SWL lijn zal dan hoger komen te liggen, Waardoor er weer erosie zal plaatsvinden.

3.6 Correctiefactoren

3.6.1 Sedimentatie

Bij lage stroomsnelheden zal rekening moeten worden gehouden met sedimentatie. Aangezien de stroomsnelheden in ondiep water lager zijn dan die in diep water, zal er mogelijk sedimentatie van grove delen plaats vinden op bijvoorbeeld het geërodeerde talud. Er wordt hier vanuit gegaan dat de stroomsnelheden door golfslag en stroming altijd groot genoeg zijn om sediment af te voeren van het strandje de rivier in. Dit materiaal zal waarschijnlijk wel sedimenteren in de rivier, en de doorvaartdiepte beperken.

3.6.2 Vegetatie

Vegetatie heeft een belangrijke invloed op de erosie. Wanneer een oever begroeid raakt zal de weerstand tegen erosie toenemen. Een begroeide oever zal onder normale omstandigheden niet eroderen (een van de belangrijkste verdedigingen tegen erosie op een dijk is een goed gesloten grasmat). Voordat vegetatie kan gaan groeien op de oever zal er eerst enige tijd geen erosie moeten hebben plaatsgevonden. Omdat lastig te bepalen is wanneer een oever begroeit raakt zal in dit rapport verder ook geen rekening worden gehouden met vegetatie op de steilwand. Daarnaast is de aard van de erosie dusdanig (erosie voornamelijk aan de teen van de steilwand) dat de erosie voornamelijk de vegetatie op maaiveld zal ondermijnen. Wel is in de modelvorming rekening gehouden met begroeiing van het maaiveld. De modellen zijn zo ingericht dat er geen erosie aan maaiveld zal plaatsvinden. In afbeelding 7 is goed te zien wat het effect is van goed doorwortelende vegetatie op de oever. In de wortelzone van de bomen wordt de oever bij elkaar gehouden. Dit biedt een extra bescherming tegen erosie. Wel moet hierbij opgemerkt worden dat de bomen op deze locatie op een gegeven moment geen houvast meer hebben en daardoor om kunnen vallen. Dit zal tijdelijk een gevaar op leveren voor de scheepvaart.



Afbeelding 7: Voorbeeld van een oever bijeengehouden door boomwortels.

3.7 Externe erosie factoren

Naast de erosie door de stroming in de rivier, zal ook erosie plaats vinden door bewegingen van mens en dier in de oever. Mens en dier kunnen door bewegingen op de steilwanden en ervoor zorgen dat lokaal door externe belastingen de steilwanden eerder instorten. Hoewel het materiaal dan nog wel weggenomen moet worden door de stroming, zal dit de snelheid van de erosie lokaal beïnvloeden.

3.8 Conclusie

De oever erosie is een samenvoeging van de erosie door golfslag en de erosie door stroming. De belangrijkste factor voor het bepalen van de erosiesnelheid is de E – waarde, of de afkalfsterkte. Deze factor bepaald samen met de kritische schuifspanning van het materiaal de erosiesnelheid, afhankelijk van de door de stroming of golfslag uitgeoefende schuifspanning op de oever.

4 Bepalen erosiesnelheid

Het bepalen van de erosiesnelheid kan op verschillende manieren. Voor het berekenen van de erosiesnelheid op een punt voor een enkele tijdstap kan handmatig gerekend worden met de in hoofdstuk 3 beschreven methode. Wanneer langere erosieperiodes doorgerekend moeten worden kan beter gebruik gemaakt worden van een gecomputeriseerd model. Vanwege de noodzaak om langere periodes door te rekenen, is gebruik worden gemaakt van gecomputeriseerde modellen. Deze modellen rekenen met de in hoofdstuk 3 vermeldde formules.

4.1 Erosie/afslagmodellen

Voor het in kaart brengen van de erosiesnelheid zijn op het moment van schrijven twee modellen in gebruik, en wordt aan een derde model gewerkt. De twee op dit moment in gebruik zijnde modellen zijn BEM³ (Bank Erosion Model) en BSTEM⁴ (Bank Stability and Toe Erosion Model). Beide modellen berekenen erosie met dezelfde achtergrond maar op een compleet verschillende manier. Bij beide modellen is het mogelijk om verschillende eigenschappen van het oevermateriaal in te voeren en dat te combineren met een belasting, om zo de erosiesnelheid te bepalen. De basis van beide modellen is hetzelfde; het oevermateriaal met een weerstand tegen erosie. Het verschil zit hem in de belastingen. BEM gebruikt de door schepen opgewekte golfslag als belasting op de oever. BSTEM gebruikt stroming langs de oever als de belangrijkste belasting.

Momenteel wordt gewerkt aan het model WAQBANK. Dit is een erosie/afslagmodel op basis van WAQUA – data. Dit model is momenteel nog in ontwikkeling door Deltares, en is nog niet geschikt voor gebruik. Eind dit jaar (2012) zal dit model opgeleverd worden. Wanneer dit model opgeleverd is zal deze waarschijnlijk BEM en BSTEM vervangen.

4.1.1 Bank Erosion Model

BEM berekent de verschuiving van de oorsprong van de steilwand door scheepsgolven. In afbeelding 9 (begrippenlijst) wordt beschreven wat de oorsprong van de steilwand is. BEM versimpelt het model tot een eenvoudig profiel met maar een type oevermateriaal en een lineair profiel van de geërodeerde oever. Zoals in paragraaf 2.3 te lezen is, volgt het geërodeerde model eerder een parabolisch profiel dan een lineair profiel. Hierdoor mist het model op dit punt een actuele weergave van de werkelijkheid. Daarnaast verandert het profiel van het strandje ook afhankelijk van de grondsoort. Dit geeft dat BEM een goede indruk geeft van de werkelijkheid.

4.1.2 Bank Stability and Toe Erosion Model

BSTEM is een model opgesteld voor het bepalen van erosie en stabiliteit in een oeverprofiel. BSTEM gebruikt de stroming langs de oever als belasting, en berekend daaruit de belastingen op de oever.

BSTEM is gemaakt voor het doorrekenen van korte datareeksen waarbij voor iedere tijdstap handmatig data ingevoerd dient te worden. Voor het doorrekenen van grotere datareeksen (het doorrekenen van meerdere jaren) is het model ongeschikt. De manier waarop het model gebouwd is kan niet goed om gaan met dit soort datareeksen.

³ Bron: Deltares

⁴ Bron: <http://bit.ly/N3aUQv>

BSTEM rekent met verhanglijnen voor het berekenen van de stroming. Deze zijn vrij gemakkelijk te berekenen uit bekende stroomsnelheid / afvoer berekeningen met Sobek, waarna er een relatie valt te leggen tussen de verhanglijn en de afvoer. Met deze relatie is het relatief eenvoudig om met behulp van waterhoogtes en afvoergegevens de uitgeoefende schuifspanningen op de oevers te berekenen.

4.2 Bepalen van de grootte van de gebruikte tijdstap

Ieder model verlangt zijn eigen invoer, waarbij het van groot belang is om een maximale grootte van de tijdstap te bepalen. Dit is voornamelijk afhankelijk van de variatie in invoergegevens en de gevoeligheid van het model. Om erachter te komen wat de ideale tijdstap is voor de verschillende modellen, is een aantal berekeningen uit gevoerd met ieder model met verschillende tijdstappen om er op deze manier achter te komen wat de grootst mogelijke tijdstap is.

4.2.1 Bank Erosion Model

De gebruikte tijdstap voor BEM is afhankelijk van de variatie in de invoergegevens. BEM kan goed overweg met grote erosiewaarden per tijdstap, en kan daarom wat erosiewaarde betreft overweg met een bijna oneindig grote tijdstap. De maximale tijdstap van BEM is dus afhankelijk van de variatie, duur en grootte van de te gebruiken tijdreeksen. Gebleken is dat bij de gebruikte tijdreeksen een tijdstap van een dag een ideale tijdstap is. De tijdstap is lang genoeg om een snelle berekening te kunnen garanderen, en niet te lang waardoor de variaties in waterstand en afvoer redelijk overeenkomen met de werkelijkheid.

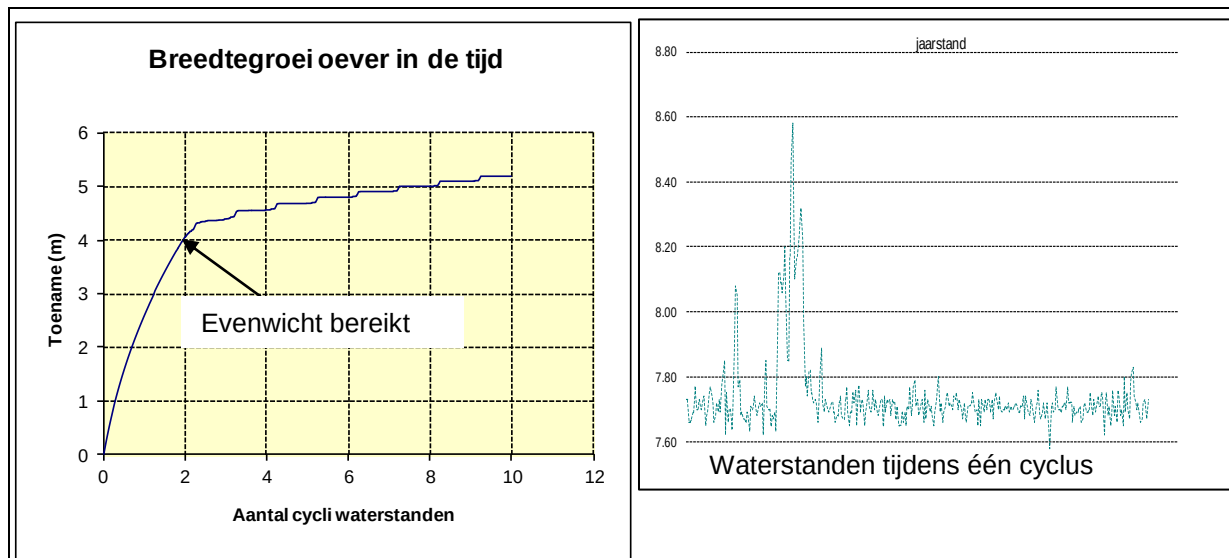
4.2.2 Bank Stability and Toe Erosion Model

BSTEM werkt met punten op de oever, deze punten worden verplaatst afhankelijk van de hoeveelheid erosie tijdens een tijdstap. Wanneer de tijdstap te groot wordt gekozen kan het zijn dat een punt zoveel verplaatst wordt dat deze gaat “zweven”. Zwevende punten hebben een crashend model tot gevolg. Het kiezen van de juiste tijdstap is daarom voor BSTEM een belangrijk proces.

Omdat de lengte van de tijdstap afhankelijk is van de maximale erosie tijdens een tijdstap kent iedere berekening zijn eigen grootste tijdstap. Om toch een tijdstap te kunnen geven welke werkt voor de meeste omstandigheden is iteratief gekeken naar de meest ideale tijdstap. Hieruit is gekomen dat voor BSTEM de ideale tijdstap 6 uur is, deze tijdstap geeft ook bij grotere erosiewaarden een stabiele berekening. Bij kleinere erosiesnelheden is het mogelijk om de tijdstap enigszins te vergroten, om daarvoor de rekensnelheid te vergroten.

4.3 Wanneer vindt er erosie plaats?

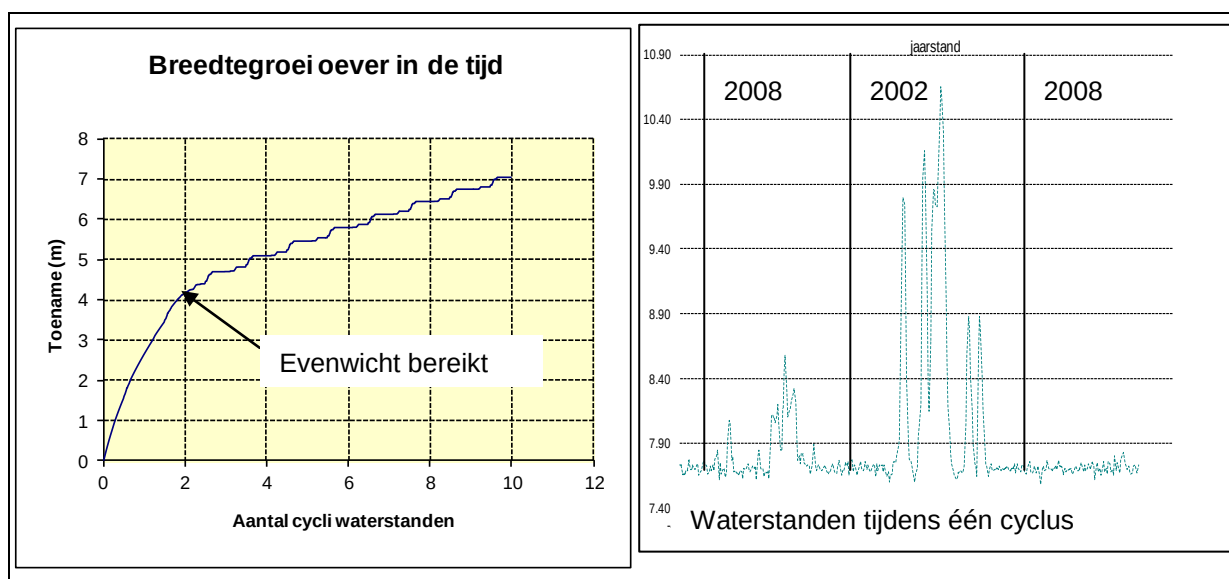
Uit waarnemingen in het veld is gebleken dat erosie voornamelijk plaats vindt tijdens de periodes met hoge waterstanden. Dit is in figuur 1 ook goed te zien, tijdens de eerste 2 jaar (cycli) vindt er een continue snel erosieproces plaats, waarna er alleen nog erosie plaats vindt tijdens een hoogwatergolf.



Figuur 1: Waterstandreeks “2008” met de voortgang van het strandje na 10 jaar (20 hoogwaters).

Voor de invoer voor deze berekening is gebruik gemaakt van de waterstanden afvoeren uit 2008 op rivierkilometer 171 (zie figuur 1). In deze waterstanden zit een hoogwatergolf van 8.6 meter +NAP, een waterstand die voor de geteste locatie (km 171) een herhalingstijd van ongeveer eens per jaar is.

Omdat erosie na het bereiken van een soort evenwicht situatie voor de normale waterstand alleen nog bepaald wordt door het aantal hoogwatergebeurtenissen, is het interessanter om de erosiesnelheid per hoogwatergebeurtenis te bepalen. Hierdoor wordt het mogelijk om de erosie te bepalen gerelateerd aan het aantal hoogwaters.



Figuur 2: Waterstandreeks “gemengd” met de voortgang van het strandje na 10 jaar (20 hoogwaters).

Om dit te berekenen zijn twee verschillende hoogwatergebeurtenissen samengevoegd tot een jaarcyclus (figuur 2). De eerste hoogwatergebeurtenis in de cyclus is het hoogwater van 2008, en het tweede hoogwater is het hoogwater van 2002. De uiteindelijk gebruikte waterstandreeks is dus een gesimuleerde waterstandreeks.

Te zien in figuur 2 is dat de riviererosie eerst een continu proces is totdat ongeveer 4 meter van de oever geërodeerd is. Dit neemt ongeveer 2 cycli (4 hoogwaters) in beslag. Dit zijn net zo veel cycli als bij de “2008” hoogwaterreeks. Hieruit kan opgemaakt worden het continue proces ongeacht de waterstanden net zo lang duurt. Hierdoor kan ook de samengestelde (figuur 2) hoogwaterreeks gebruikt

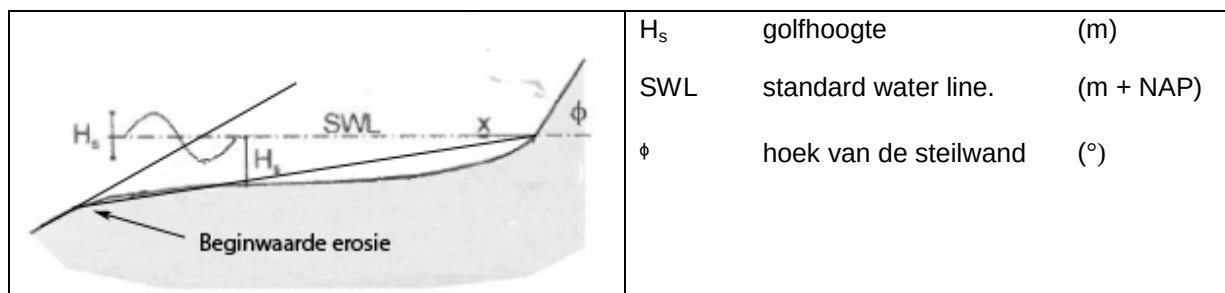
worden om de berekeningen mee uit te voeren. Door te rekenen met deze hoogwaterreeks kan de rekentijd verkort worden, maar moet de erosie wel uitgezet worden tegen het aantal hoogwaterperiodes.

4.4 Scheepsgolven op de oever.

Tijdens de Initiële erosiefase zal de erosie voornamelijk plaats vinden door scheepsgolven. Hiervoor dient de golfhoogte op de oever bepaald te worden. Deze golfhoogte is afhankelijk van de afstand van het schip tot de oever, de helling van de vooroever, de hoogte waarop de oever begint te eroderen, en de snelheid van het schip. Om dit te berekenen is BEM voorzien van een module waarmee de golfhoogte berekend kan worden.

4.5 Beginwaarde erosie door golven.

Golven oefenen pas vanaf een bepaalde waterdiepte invloed uit op de oever. Deze diepte is afhankelijk van de helling van de vooroever, golfhoogte en korrelgrootte mediaan van het oevermateriaal. De golfhoogte en beginwaarde van de erosie beïnvloeden elkaar direct, en het bepalen van de beginwaarde is dus ook een iteratief proces. Voor het berekenen van de beginwaarde van de erosie, het snijpunt tussen de vooroever en het strandje, (zie afbeelding 8) is een spreadsheet gemaakt welke de beginwaarde van de erosie (m – stuwpeil) bepaald aan de hand van de golfhoogte en korrelgroottemediaan. Dit spreadsheet berekent daarnaast ook de taludhelling van de geërodeerde oever. Met behulp van dit spreadsheet kan in BEM met een iteratief proces een nieuwe golfhoogte bepaald worden, en aan de hand daarvan weer een nieuwe beginwaarde voor de erosie. Dit spreadsheet is opgenomen in het BEM spreadsheet op de CD-ROM, en bijlage 2 (tabblad “Oeverparameters”). Het spreadsheet berekend eigenschappen 15 en 16 van tabel 6.



Afbeelding 8: Beginwaarde erosie.

4.6 Erosie door een hoogwatergebeurtenis.

De mate van erosie door een hoogwatergebeurtenis is lastig te voorspellen, iedere hoogwatergebeurtenis is uniek met andere waterstanden en afvoeren. Daarnaast verschilt de geometrie van de geërodeerde oever en de steilwand tijdens iedere hoogwatergebeurtenis, waardoor stroomsnelheden kunnen verschillen. Om toch een indruk te kunnen geven van erosie tijdens een hoogwatergebeurtenis wordt de oever met BSTEM doorgerekend voor verschillende hoogwatergebeurtenissen. Hieruit valt de maximaal optredende erosie per hoogwatergebeurtenis te herleiden. De optredende erosie zal naar verwachting groter zijn dan de erosie tijdens een t=10 situatie, maar geeft wel een indruk van de mate van erosie.

Erosie door golfslag zal tijdens een hoogwatergebeurtenis minder zijn, of zelfs compleet wegvallen. Dit omdat tijdens een hoogwatergebeurtenis de waterstand tot ver boven de steilwand zal komen, en de golven daardoor geen effect meer hebben op de steilwand.

5 Berekeningen BEM

Om de resultaten van BEM te testen is gebruik gemaakt van een reeks afgeleide gestandaardiseerde eigenschappen van de oever en waterstanden om op deze manier de gevoeligheid van de verschillende invoerdata te kunnen bepalen. Er is voor gekozen om de berekeningen uit te voeren voor een gestandaardiseerde oever gebaseerd op daadwerkelijk voorkomende data vanuit de Maas. Er is voor gekozen om de oevermateriaal gegevens te laten variëren, en om vaste profieldata te gebruiken per berekening.

5.1 Vaste eigenschappen oever

De vaste eigenschappen van de oever zijn afgeleid uit de actuele gegevens, maar vereenvoudigd uit praktische overwegingen. In tabel 5 zijn de gegevens van de oever te vinden.

Nr.	Eigenschap	Eenheid	Waarde
1	Rivierbreedte	(m)	140.00
2	Bodemniveau van de rivier	(m+NAP)	1.50
3	Referentiewaterpeil / stuwpeil	(m+NAP)	7.50
4	Chézy-coëfficiënt zomerbed	($\sqrt{m/s}$)	50
5	Taludhelling onderwateroevers	(1:n)	4
6	Erosiesnelheid waarbij steilrand begroeit en stopt te eroderen	(m/jaar)	0.84
7	Aantal scheepspassages per jaar	(1/jaar)	8876
8	Aantal maatgevende secundaire golven per passage	(1/jaar)	5
9	Scheepssnelheid	(m/s)	3.5
10	Lengte schip ten behoeve van bepaling passeertijd	(m)	185.00
11	Diepgang schepen	(m)	4.50

Tabel 5: ingevoerde gegevens voor BEM.

Verder zijn de waterstandgegevens gebruikt zoals beschreven in hoofdstuk 4, waarbij gebruik wordt gemaakt van de reeks met 2 hoogwaters per jaar (figuur 2). De Scheepsgegevens (7, 8, 9, 10, 11) zijn afgeleid uit door Rijkswaterstaat verstrekte gegevens. Het aantal scheepspassages is afgeleid uit het aantal passages bij de sluis Grave. Sluis Grave kende over 2011 een totaal aantal van 25,150 passages. Deze bewegingen bestonden uit 9,448 passages van binnenvaart, en 6,801 passages van lege binnenvaartschepen. Er blijven dus 8,876 vaarbewegingen over van volle binnenvaartschepen, en een totaal van 25 passages door zeevaart. Het formaat van de schepen is afgeleid van de vaarwegklasse. Welke tijdens de uitvoering van de Maaswerken⁵ opgeschaald wordt naar klasse Vb.

⁵ Zie website Rijkswaterstaat: <http://bit.ly/Maaswerken>

5.2 Variabele eigenschappen oever

In tabel 6 zijn de eigenschappen weergegeven die variëren per situatie. Aangegeven is of dat dit invoervariabelen zijn, of dat deze voortkomen uit veranderingen van de invoervariabelen.

Nr.	Eigenschap	Parameter	eenheid	variatie	Afhankelijkheid
12	Afkalfsterkte oevermateriaal	E	(1/ms)	0.00005 – 0.001	Invoer
13	Kritische schuifspanningsnelheid	τ_{cr}	(N/m ² /s)	0.6, 2, 5	12
14	Diameter niet cohesieve sedimentfractie	D ₆₀	(m)	0.00019 – 0.00093	Invoer
15	Taludhelling van de geërodeerde vooroever	β	1:n	> 1	14
16	Beginwaarde erosie	α	(m+NAP)	< 7,5	15 / invoer
17	Froudegetal	Fr	(-)	<0.8	16, 18
18	Initiële binnenkomende scheepsgolfhoogte	H _s	(m)	>0	17, 16, 11, 9

Tabel 6: Lijst met variabele invoereigenschappen voor de oever.

Ook zijn hierbij ingegeven waarvan de desbetreffende variabele afhankelijk is, ofwel, waarmee deze berekent of bepaald wordt. Variabele nummer 16 (beginwaarde erosie) is ofwel een invoervariabele of een berekende variabele. Dit verandert wanneer de oeverbescherming hoger is dan de berekende waarde voor de beginwaarde erosie. De beschreven D₆₀ (14) betreft de korrelgrootte van het materiaal wat op het “strandje” blijft liggen na de erosie. In de grafieken wordt deze daarom ook voor alle bodemtypen doorerekend, en is onafhankelijk van het bodemmateriaal.

5.3 Uitgevoerde berekeningen.

Om de gevoeligheid van de invoerparameters te kunnen bepalen zijn berekeningen uitgevoerd waarbij waar mogelijk zo veel mogelijk invoereigenschappen met elkaar vergeleken zijn. Het doel hierachter is om zo veel mogelijk data met elkaar te kunnen vergelijken. En om met deze data zo veel mogelijk situaties te kunnen beschrijven. Hierdoor is het mogelijk om voor meerdere locaties berekeningen uit te voeren. De uitgevoerde berekeningen maken gebruik van de formules van hoofdstuk 3.3, 3.4 en 3.5. Waarbij uit hoofdstuk 3.4 de lange formule voor het berekenen van de stroomsnelheid, en de daaraan gerelateerde schuifspanning gebruikt wordt, omdat de erosie bij deze berekeningen wordt berekend met een belasting van uitsluitend golven.

5.3.1 Test 1, afkalfsterkte en diameter

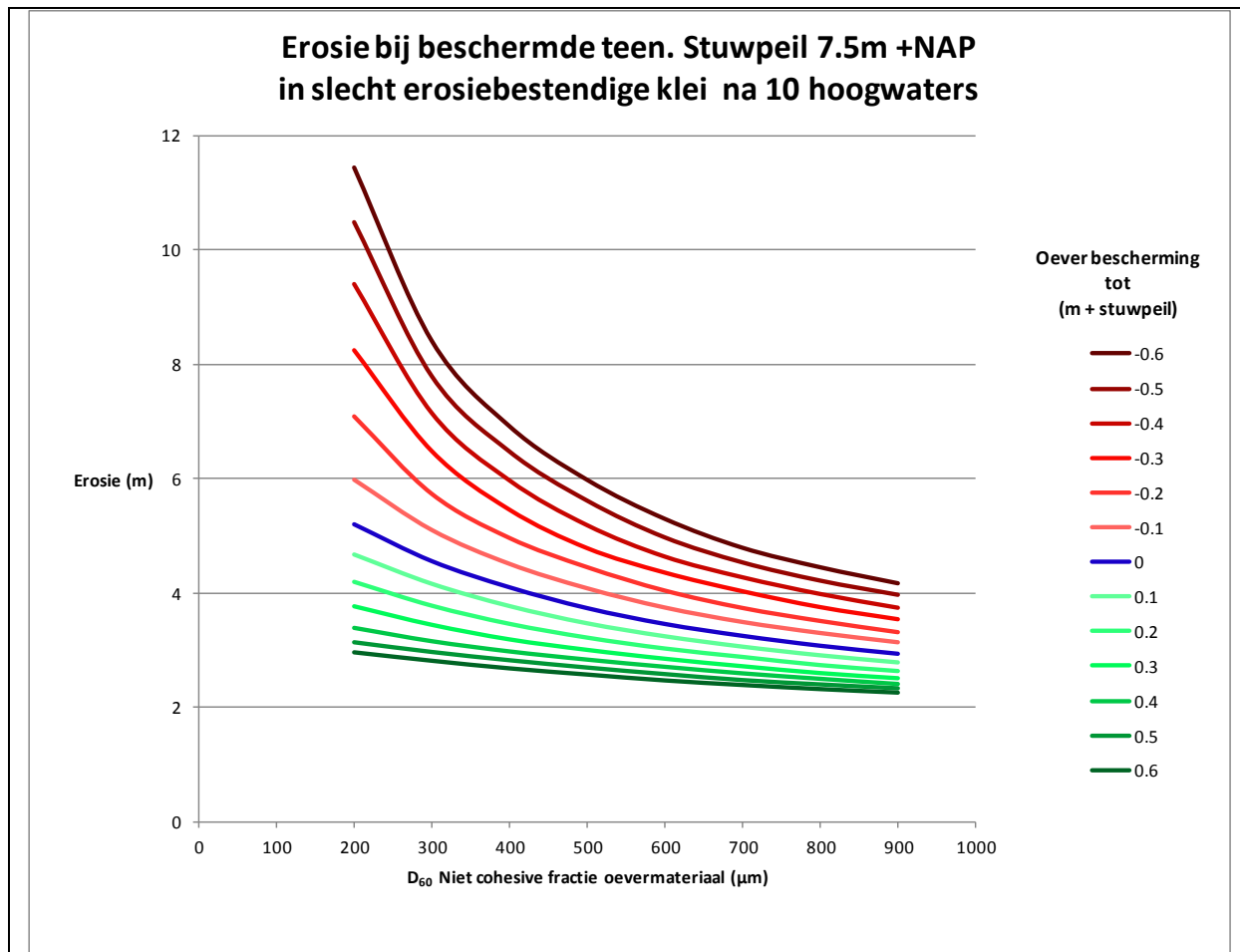
In de eerste test zijn de afkalfsterkte en diameter van het niet cohesieve sedimentfractie gevarieerd. De resultaten van deze berekeningen zijn samengevat in grafieken in bijlage 3a, 3b en 3c. Op de horizontale as is de afkalfsterkte uitgezet, zie hiervoor hoofdstuk 3, op de verticale as staat de erosie uitgezet, uitgedrukt in meters, en de grafiek is opgebouwd uit de variërende korrelgrootte waaruit het strandje kan bestaan.

Deze test is gedaan voor een periode van 5 jaar (bijlage 3a), 2 jaar (bijlage 3b) en 1 jaar (bijlage 3c), of respectievelijk 10, 4, en 2 hoogwatersituaties volgens de in hoofdstuk 4 genoemde definitie.

De afwijking in erosie ten gevolge van een andere korrelgrootte, is maximaal 250% (erosie na 10 hoogwaters, afkalfsterkte 0.0002). Wanneer dus met de (in dit voorbeeld) maximale zandfractie gerekend wordt zal de erosie maximaal 250% van de berekende erosie zijn. Of andersom, wanneer de korrelgrootte minimaal wordt gekozen zal de te verwachten erosie minimaal 60% van de berekende erosie zijn. Dit varieert enigszins afhankelijk van de afkalfsterkte en het aantal jaren en hoogwatergebeurtenissen, maar varieert enigszins tussen de 200 en 250% (resp. 50 en 60%) van de berekende erosie.

5.3.2 Test 2, variatie in bescherming van de teen.

Deel van de opdracht is het bepalen van het effect van het verwijderen van meer of minder stortsteen ten opzichte van stuwpeil. De resultaten hiervan zijn te zien in grafiek 2. De grafiek laat de relatie zien tussen de mate van ontstening (t.o.v. stuwpeil) en de diameter van het niet cohesieve oevermateriaal. In deze grafiek kan je goed zien dat het weghalen van minder stortsteen direct effect heeft op de erosie. Een reductie van 30 tot 55% erosie kan in slecht erosiebestendige klei bereikt worden door de vooroeverbewerking door te laten lopen tot stuwpeil, ten opzichte van het verwijderen van de bescherming tot 0.6 meter onder stuwpeil.



Grafiek 2: erosie bij beschermde teen

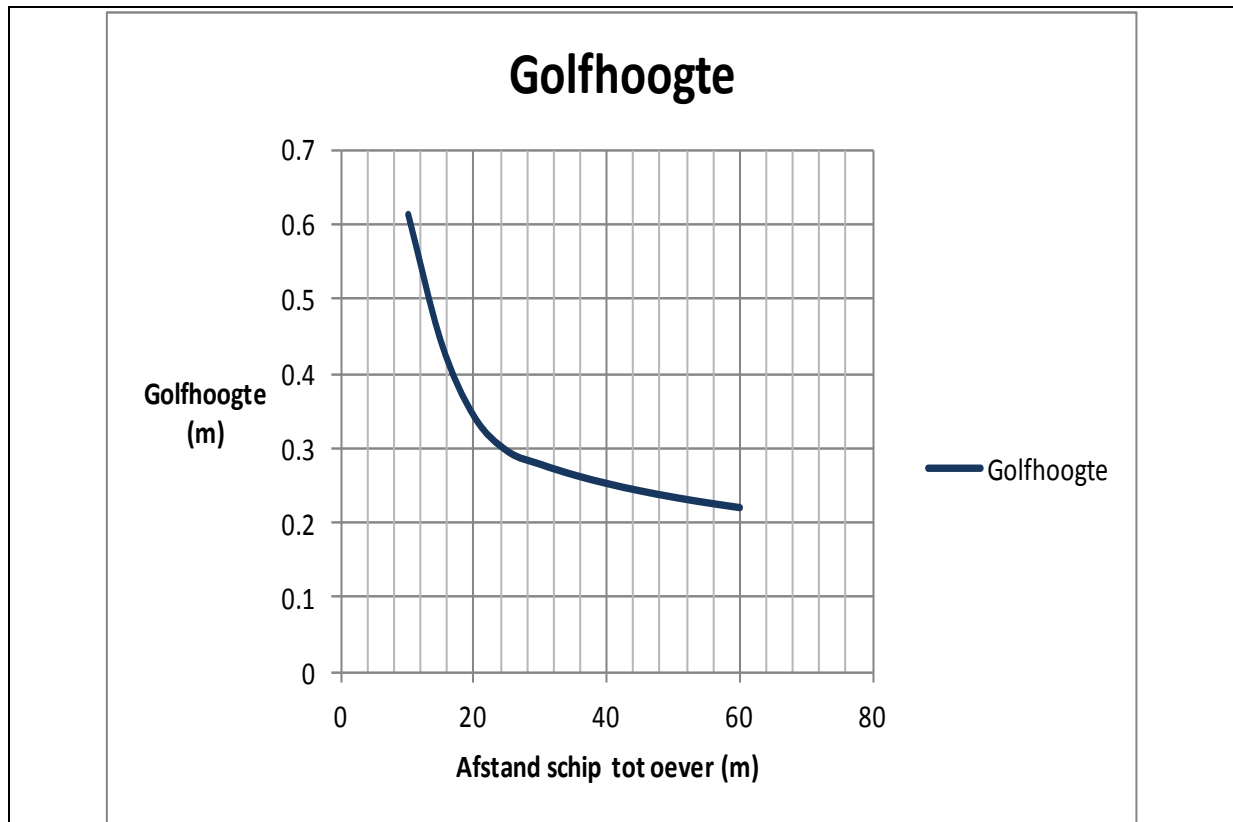
Een verdere reductie kan bereikt worden door het laten doorlopen van de oeverbescherming tot boven stuwpeil. Hiermee kan een extra reductie van 25-40% bereikt worden (bij het laten doorlopen van de bescherming tot 60cm boven stuwpeil) waarmee de totale reductie uit komt op 45-75% afhankelijk van de korrelgrootte van het oevermateriaal.

Het verschil in erosie bij de verschillende korrelgroottes wordt in bovengenoemde situatie voornamelijk veroorzaakt door het steilere strandje, wat weer veroorzaakt wordt door de grotere korrelgrootte. Door de steilere steilwand krijgen de golven sneller minder grip op de steilwand, en is sneller een hoogte bereikt waarbij er tijdens normale waterstanden geen erosie meer plaats vindt.

5.3.3 Test 3, Afstand ship tot oever

Het beperken van de golfslag op de oever kan een behoorlijke vermindering van de erosie bewerkstelligen. In bijlage 4 is de bijbehorende grafiek te zien. In deze grafiek is de erosie uitgezet tegen de diameter van het materiaal van het strandje, doorgerekend voor verschillende afstanden tussen het

schip en de oever. Te zien is dat de afstand tussen de schepen en de oever een grote invloed heeft op de erosie. Dit komt door de verminderde golfhoogte op de oever, zoals te zien is in grafiek 3.



Grafiek 3: golfhoogte in relatie tot de afstand van het schip tot de oever.

5.4 Conclusie

In dit voorbeeld vindt de meeste erosie plaats in slecht erosie bestendige bodems, zoals een fijn zandige bodem. Door de eigenschappen van dat zand zal een flauw strandje ontstaan, waardoor de golfslag minder gedempt wordt. Wanneer het oevermateriaal grover is, zal een steiler strandje ontstaan, waardoor de golfslag sneller gedempt wordt, zodat ondanks een eventueel gelijke afkalfsterkte de erosiesnelheid beperkt wordt. In dit voorbeeld is een verschil van maximaal 250% berekend tussen de verschillende korrelgroottes. Ook is de hoeveelheid erosie erg afhankelijk van de hoogte van de oeversbeschermer. In de uitgevoerde berekeningen is een reductie van de erosie zichtbaar van maximaal 75% door het laten doorlopen van de oeversbeschermer tot 0.6 meter boven stuwpeil, in plaats van 0.6 meter onder stuwpeil. Het verschil in erosie door een variatie in afstand tussen de schepen en de oever is in de uitgevoerde berekeningen ook vrij groot. Bij de berekende situatie levert een vergroting van de afstand van het schip tot de oever van 10 tot 25 meter een reductie van maximaal 70% op.

6 Berekeningen BSTEM

Naast de berekende erosie door golfslag vindt er tijdens een hoogwaterperiode ook erosie plaats door stroming. Om erachter te komen hoe groot de erosie ten gevolge van stroming is, zijn er verschillende berekeningen gedaan met BSTEM. Er is gekeken naar het effect van het ontstienen van de oever, en de variatie in verschillende grondsoorten.

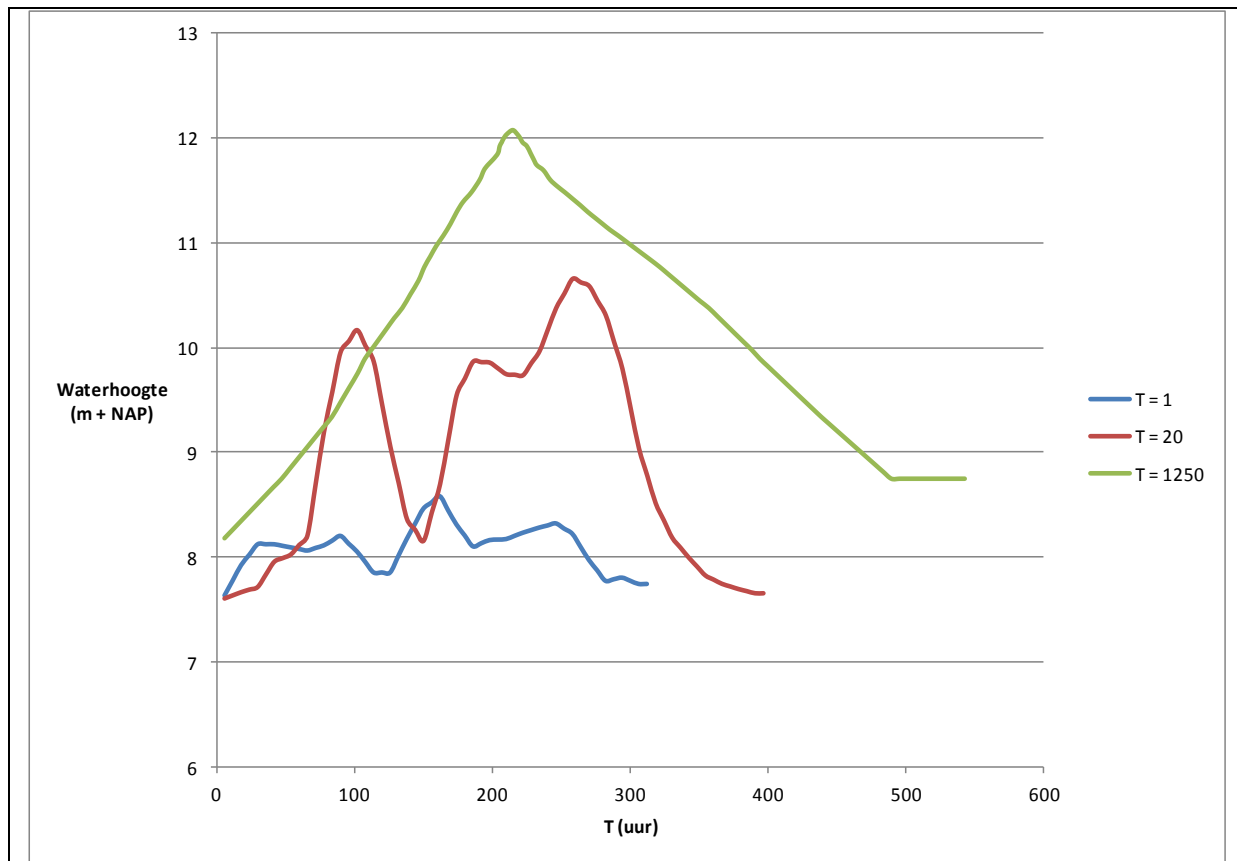
6.1 Rekenreeksen

De erosie wordt telkens doorgerekend voor 3 verschillende waterstandscenario's (zie Grafiek 4), een gebeurtenis met een herhalingskans van eens per jaar ($T = 1$), en is afgeleid uit de in figuur 2 beschreven hoogwatergebeurtenis van 2008. Daarnaast een gebeurtenis met een herhalingskans van eens per 20 jaar ($T = 20$), en deze is afgeleid uit de in figuur 2 beschreven hoogwatergebeurtenis van 2002. En de maximale hoogwatergebeurtenis waarop de maas bij rivierkilometer 171 berekend is ($T = 1250$). De $T = 1:1250$ jaar gebeurtenis is een fictieve gebeurtenis, afgeleid uit de gegevens van Rijkswaterstaat.

In tabel 7 is de tijdsduur van de verschillende hoogwaterperiodes samengevat.

	T=1:1	T=1:20	T=1:1250
Totale tijdsduur hoogwater (dagen)	13	16.5	22.6
Maximale waterstand (m +NAP)	8.6	10.7	12.1
Gemiddelde waterstand (m +NAP)	8.0	9	10.2

Tabel 7: waterstandgegevens hoogwaterperiodes.



Grafiek 4: Hoogwatergebeurtenissen.

6.2 Vaste eigenschappen oever

In tegenstelling tot BEM berekent BSTEM de meeste variabelen zelf. Wel zijn de berekeningsmethoden voor verschillende variabelen verschillend. Daarom is ervoor gekozen om 4 verschillende standaard bodemtypen van BSTEM vast te stellen: fijn zand, zwakke klei, matige klei, en sterke klei, zie tabel 8

	Zand	Zwakke klei	Matige klei	Sterke klei
Korrelgrootte	0.180	-	-	-
τ_c	0.128	0.6 Pa	2 Pa	5 Pa

Tabel 8: eigenschappen bodemtypes.

Voor de geometrie van de oever is ervoor gekozen om dezelfde waarden aan te houden als bij BEM, een hoogte van het maaiveld van 9.4 meter, en talud van de onderwateroevers van 1:4. Overige waarden zoals ingevoerd in BEM zijn niet van toepassing in BSTEM.

6.3 Testen BSTEM

Om te kunnen bepalen wat de erosie is tijdens een hoogwatergebeurtenis, zijn er een aantal testen met BSTEM gedaan, deze testen bestaan uit het uitvoeren van een aantal berekeningen waarbij er gebruik gemaakt wordt van de methodes van hoofdstuk 3.3 en 3.4. Omdat het model zelf bepaald wat de geometrie van de oever is na het uitvoeren van een berekening is de formule van hoofdstuk 3.5 niet nodig. Het model gebruikt dus alleen de afkalfsterkte en de uitgeoefende schuifspanningen. Eerst zijn een aantal testen uitgevoerd om te bepalen wat het effect van oeverbescherming is op de erosie boven aan het profiel. Hierna zijn een aantal testen uitgevoerd om de maximale hoeveelheid erosie te bepalen onder invloed van de verschillende rekenreeksen.

6.3.1 Test 1: Erosie van de oever naar de mate van ontstening

De eerste test die is uitgevoerd betreft relatie tussen de mate van ontstening (start erosiewaarde) en de erosie door stroming. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een standaardoever, waarbij de $T = 1250$ hoogwatergebeurtenis gebruikt is. Als oevermateriaal is zand gekozen, zodat de erosie goed zichtbaar is.

In de grafiek van bijlage 5 zijn dwarsdoorsneden van de oever te zien voor en na de hoogwatergolf. Het betreft hier synthetische testen om te bekijken of dat de mate van ontstening aan de onderkant van de oever, invloed heeft op de erosie aan de bovenkant van het profiel. Te zien is de erosie ten gevolge van een hoogwatergolf in een profiel waar nog niet eerder erosie heeft plaats gevonden. Iedere lijn in de grafiek beschrijft een situatie na de erosie, waarbij iedere lijn een andere “begin erosiewaarde” vertegenwoordigt.

In de grafiek van bijlage 5 is te zien dat er bovenaan het profiel geen verschil in erosie is. Dit wordt veroorzaakt door de schuifspanningen, welke afhankelijk zijn van de waterstand boven het punt, niet van de waterstand onder het punt.

Hieruit is op te maken dat de erosie aan de onderkant en de bovenkant van een profiel geen directe relatie met elkaar hebben. Dit heeft tot gevolg dat ongeacht de bescherming aan de teen, de bovenkant van de oever zal eroderen, en dat de steilwand evenveel zal opschuiven.

Bij een beschermde teen zal er wel minder materiaal worden weggenomen als bij een onbeschermde teen. Dat er minder materiaal wordt weggenomen zal bij een beschermde teen kunnen werken als een extra buffer, waardoor de “normale erosie” door scheepsgolven wordt vertraagd, of in ieder geval niet sneller zal gaan.

6.3.2 Test 2: Erosie in verschillende grondsoorten.

Om erachter te komen hoe snel erosie gaat in verschillende grondsoorten is ervoor gekozen om de verschillende grondsoorten voor maar één beschermingssituatie door te rekenen. Dit omdat mate van bescherming geen invloed heeft op de mate van erosie bovenaan het profiel.

Eerst zijn een aantal test-runs gedaan voor verschillende grondsoorten en hoogwatergebeurtenissen. Hieruit is gebleken dat tijdens een $T = 1$ hoogwatergebeurtenis de maximale erosie verwaarloosbaar ($< 20\text{cm}$) is. Hieruit kan worden opgemaakt dat de extra erosie tijdens een “normale” hoogwatergebeurtenis verwaarloosbaar is. Dit blijkt ook uit de uiteindelijke resultaten van de berekeningen, hierin vertegenwoordigd de blauwe lijn de $T = 1$ situatie, en deze geeft alleen in zand (een verwaarloosbare) erosie.

De resultaten zijn te zien in bijlage 6, deze betreffen net zoals bijlage 5 dwarsdoorsneden van het oeverprofiel, na erosie. Er is bij deze berekeningen uitgegaan van een bescherming tot stuwpeil ($7.5\text{m} + \text{NAP}$) de doorsneden betreffen erosie in de vier beschreven grondsoorten, zand (bijlage 6a), zwakke klei (bijlage 6b), matige klei (bijlage 6c) en sterke klei (bijlage 6d). Waarbij in iedere grafiek de berekening is gemaakt voor de 3 hoogwatersituaties, $T = 1$, $T = 20$ en $T = 1250$.

In tabel 6 staat een samenvatting van de erosie ten gevolge van de verschillende hoogwaterperiodes. In deze tabel zijn de erosie waarden afgrond op hele meters, om de onnauwkeurigheid van de gegevens aan te geven.

	$T = 1$	$T = 20$	$T = 1250$
Zand	-	2 m	4 m
Zwakke klei	-	1 m	2 m
Matige klei	-	-	1 m
Sterke klei	-	-	-

Tabel 9: Erosie in verschillende grondsoorten, ten gevolge van verschillende hoogwaterperiodes.

Bij de $T = 20$ hoogwatergebeurtenis vindt er alleen in zand en in zwakke klei zichtbare erosie plaats. Respectievelijk 2 en 1 meter. Bij meer erosiebestendige klei vindt geen significante erosie plaats door stroming tijdens een $T = 20$ hoogwatersituatie.

Bij de $T = 1250$ hoogwatersituatie vindt er in alle bodemtypes erosie plaats. Maximaal 4 meter in zand tegenover een paar cm in sterke klei. In tabel 6 staat aangegeven dat er in sterke klei geen erosie plaats vindt, dit komt door het afronden van de waarden.

6.4 Conclusie

De grootste erosie ten gevolge van stroming wordt in dit voorbeeld veroorzaakt in zand en zwakke klei. Deze erosie treedt alleen op tijdens de $T = 20$ en $T = 1250$ hoogwatergebeurtenissen. Tijdens de $T = 1$ hoogwatergebeurtenis treedt er in dit voorbeeld geen erosie op door stroming. Dit wordt veroorzaakt door het uitblijven van grote stroomsnelheden tijdens deze hoogwatergebeurtenis in het geteste deel van de Maas. Wanneer op een andere locatie van de Maas de stroomsnelheid hoger is, is het goed mogelijk dat er daar wel erosie op treedt. Dit komt omdat de stroomsnelheid die de schuifspanning veroorzaakt groter moet zijn dan de kritische schuifspanning van de bodem. ($\tau_w > \tau_{cr}$).

Omdat de erosie tijdens de $T = 1$ situatie verwaarloosbaar is, zijn alleen de $T = 20$ en $T = 1250$ erosiewaarden relevant. Om hier verder mee te kunnen rekenen is tabel 10 opgesteld.

	Zand	Zwakke klei	Matige klei	Sterke klei
$T = 20$	2 meter	1 meter	-	-
$T = 1250$	4 meter	2 meter	1 meter	-

Tabel 10: Hoeveelheid erosie ten gevolge van een hoogwaterperiode.

7 Analyse modelresultaten.

De gegevens gegenereerd in hoofdstuk 5 en 6 zijn gegenereerd voor een standaard profiel in een recht deel van de oever van de Maas. Om erachter te kunnen komen in hoeverre deze gegevens bruikbaar zijn om gebruikt te worden om de mate van erosie weer te kunnen geven dient gekeken te worden naar wijzigingen in eigenschappen van de oever, en in hoeverre kan worden aangetoond dat de gebruikte modellen ook daadwerkelijk werken. Ook dient er een relatie tussen BEM en BSTEM gelegd te worden.

7.1 Wijzigingen in eigenschappen

De resultaten van BEM en BSTEM geven een indruk van de ordegrottes voor erosie in de Maasoevers. Maar nu dient zich de vraag aan hoe dat deze gegevens gebruikt kunnen worden om voor oevers langs de Maas te bepalen wat de erosie daar is. Om dat te kunnen bepalen is het van belang om eerst na te gaan wat voor effect van het aanpassen van verschillende eigenschappen van de oever heeft op de erosie. Aan de hand hiervan kan worden bepaald of dat BEM en BSTEM bij elkaar opgeteld kunnen worden, en of dat de gegevens bruikbaar zijn in andere delen van de Maas.

7.1.1 Geometrie van de oever

De hypothese is dat de uitkomsten van de modellen voor zover het de geometrie betreft doorgevoerd kunnen worden naar andere locaties langs de rivier. BEM berekend een erosie zolang als dat er golfslag tegen de oever aan staat. Dit betekent dat er geen erosie plaats vindt wanneer de waterstand lager is dan de bovenkant van het strand, of wanneer de waterstand hoger is dan maaiveld. Wanneer dit vergeleken wordt met de waterstanden blijkt dat maar een korte periode tijdens de gebruikte gegevenreeks de waterstand boven maaiveld uit komt. Hierdoor kan worden aangenomen dat er maar weinig verschil in berekende erosie is wanneer het verschil tussen maaiveld en stuwpeil groter is dan de huidige 2 meter (stuwpeil 7.5m + NAP, maaiveld 9.5 m + NAP). Wanneer het verschil afneemt, zal de erosie door golfslag afnemen, de golfslag zal minder lang tegen de oever aan staan, en daardoor minder erosie veroorzaken.

Voor BSTEM is de geometrie van belang, al is het niet alleen omdat BSTEM een bestaande geometrie aanpast, en een nieuwe aanmaakt. Ondanks dit, kan de berekening zoals gedaan in de huidige geometrie ook gebruikt worden voor andere situaties. De theorie achter de berekening verandert niet veel, en de hoeveelheid weggenomen materiaal blijft hetzelfde, ongeacht de geometrie. Wel zal bij een hogere steilwand de mogelijkheid toenemen dat de steilwand ondergraven wordt en in zal storten. Dit heeft dan weer tot gevolg dat de geometrie, en bodemmaterialen dusdanig worden aangepast dat de oever na een instorting tijdelijk op een andere manier zal eroderen.

7.1.2 Oevermateriaal

De eigenschappen van het oevermateriaal zijn allesbepalend voor de erosiesnelheid, een kleine wijziging in bijvoorbeeld korrelgrootte kan een grote verandering ten gevolg hebben. Dit omdat de korrelgrootte verschillende factoren beïnvloedt, (taludhelling strandje en het beginniveau erosie). Daarom is het van belang om zo accuraat mogelijk deze waarde in te vullen, of om zo veel mogelijk verschillende waarden te gebruiken en hier dan de waarde uit te kiezen die het meest overeen komt met de werkelijkheid. Om deze reden is in de berekeningen voor het BEM model al rekening gehouden met verschillende oevereigenschappen. Deze zijn voor verschillende situaties doorgerekend, en met elkaar vergeleken. Dit is gedaan omdat een verandering in samenstelling van het oevermateriaal al een behoorlijke variatie in erosie kan geven, het talud van het strandje veranderd, en daardoor de golfhoogte en daardoor de beginwaarde van de erosie.

In BSTEM is rekening gehouden met een minder grote verscheidenheid aan oevermaterialen, dit omdat in BSTEM het type oevermateriaal alleen de erosiesnelheid bepaald, en de erosiesnelheid zoals verderop gemeld, zo conservatief mogelijk genomen wordt. Hoewel er rekening is gehouden met een (minder grote) verscheidenheid aan oevermaterialen, is het wel mogelijk om met de gegenereerde resultaten een indruk te geven van de hoeveelheid erosie.

7.1.3 Locatie

Voor de berekeningen zijn van een locatie, rivierkilometer 171 in het stuwpannd Grave de waterstand en scheepsgegevens gebruikt. Deze gegevens zijn voor deze locatie zeer bepalend. De waterstand, afvoer en stroomsnelheid zijn allemaal aan elkaar gekoppeld. Omdat de gebruikte locatie in het gestuwde deel van de Maas ligt zijn gebruikte gegevens niet een op een kopieerbaar naar een andere locatie. De afvoercharacteristieken verschillen waarschijnlijk te veel van locatie tot locatie, de afvoer blijft gelijk, maar de bij de afvoer behorende stroomsnelheden en waterstanden kunnen fors verschillen. Wel kan op een andere locatie de gebruikte methode gebruikt worden wanneer de gegevens worden aangepast naar de relatie tussen de afvoer en het verhang, en de waterstanden worden aangepast.

Ook het belang van het aanpassen van de scheepsgegevens naar de veranderde locatie is van belang. Het kan zijn dat op een andere locatie in de Maas de scheepvaart compleet anders is, er kan een hogere verkeersdichtheid zijn, en het is mogelijk dat de vaarwegklasse op een andere locatie zwaarder of lichter is. Voornamelijk een verandering in verkeersintensiteit kan een behoorlijke invloed hebben op de erosie, 10% minder scheepsbewegingen zal naar alle waarschijnlijkheid 10% minder erosie ten gevolg hebben.

Geconcludeerd kan worden dat voor het stuwvak Grave de meeste bodemtypen in de testen behandeld zijn. Voor andere delen van de Maas kunnen de gegenereerde resultaten naar alle waarschijnlijkheid niet gebruikt worden, omdat hier niet alleen de bodemtypen verschillen, maar ook de afvoercharacteristieken. Wel kan de gebruikte methode gebruikt worden voor het doorrekenen van situaties op andere locaties in de Maas, of zelf op andere rivieren.

Deze conclusie komt dus niet overeen met de aan het begin van dit hoofdstuk gestelde hypothese. Dit komt doordat alle eigenschappen

7.2 Relatie BEM en BSTEM

Er zijn verschillende resultaten uit BEM en BSTEM gekomen, welke beide een hoeveelheid erosie berekenen op basis van dezelfde dataset, maar de erosie wordt op een andere manier berekend. Om de vraag te kunnen beantwoorden of dat de resultaten van de verschillende modellen zo maar bij elkaar kunnen worden opgeteld is het handig om eerst de vraag te stellen of dat de erosie bij beide modellen op het zelfde moment op treedt. In eerste instantie lijkt dit wel het geval te zijn. Bij BEM en BSTEM vindt de voornaamste erosie tijdens de hoogwatergebeurtenissen plaats. Hierdoor lijkt het erop dat er tijdens een hoogwatergebeurtenis erosie plaats vindt door stroming en door golfslag. Wanneer dit het geval zou zijn lijkt het erop dat beide vormen van erosie een op een bij elkaar opgeteld kunnen worden.

Om verschillende redenen klopt het niet dat de verschillende vormen van erosie bij elkaar opgeteld kunnen worden. Tijdens extreme waterstanden op de Maas kan het zijn dat om verschillende redenen het scheepvaartverkeer stil gelegd wordt. Hierdoor valt onder deze situaties de erosie door scheepsgolven weg. Hierbij moet wel aangetekend worden dat deze factor bij die waterstanden waarschijnlijk al niet bestaat, omdat deze waterstanden naar alle waarschijnlijkheid hoger zijn dan maaiveld, en erosie door golven niet aanwezig is. Ook is niet het effect van golfslag en golven samen onderzocht. In hoofdstuk 3 is wel een vergelijking gegeven van de effecten van golven en stroming op de uitgeoefende schuifspanningen op de oever, maar deze houdt geen rekening met demping van de scheepsgolf, en is daarom niet geschikt om schuifspanningen op de oever mee uit te rekenen.

De erosie door stroming is berekend voor drie verschillende hoogwatersituaties, een met een herhalingsperiode van 1 jaar, een met een herhalingsperiode van 20 jaar, en een met een herhalingsperiode van 1250 jaar. Bij de erosie met een herhalingsperiode van 1 jaar is geen zichtbare erosie opgetreden, bij deze waterstanden kan er dus voor rivierkilometer 171 vanuit gegaan worden dat er geen erosie op zal treden.

De hoogwatersituatie met een herhalingsperiode van eens in de 1250 jaar heeft een kans dat deze voorkomt van 0.08% per jaar. Wanneer de erosie wordt berekend over een periode van 10 jaar, dan heeft deze situatie geen invloed.

Wat over blijft is de hoogwaterperiode met een herhalingskans van eens per 20 jaar. Deze heeft binnen 10 jaar een reële kans van voorkomen (50%). En zou dus bij de erosie door golven opgeteld kunnen worden.

7.3 Totale erosie

De erosie geeft geen snelheid in meters per jaar, en redeneren vanuit de een erosiesnelheid per jaar is niet erg verstandig. Het is verstandiger om te redeneren vanuit een bepaalde onderhoudsvrije periode, en daar conclusies aan te hangen. Deze aanpak laat namelijk de ruimte vrij om voor het meenemen van extra veiligheidsfactoren, zoals een extreme hoogwatersituatie. Op deze manier is het bijvoorbeeld mogelijk om te bekijken wat de maximaal te verwachten erosie in zand is met een onderhoudsinterval van 10 hoogwaters⁶ (10 jaar). Hieruit zou de volgende berekening opgesteld kunnen worden (tabel 11)

In de berekening is rekening gehouden met de berekening van BEM en de uitkomsten van BSTEM. Er is gekozen om bij de erosie door BEM éénmaal de T = 20 hoogwatersituatie op te tellen.

Als dezelfde berekening wordt uitgevoerd voor een zwak kleiige oever, zal deze er ongeveer hetzelfde uit zien als de berekening na voor zand, zie tabel 12.

De voornaamste erosie is de erosie door golfslag en daarnaast vindt er ook nog erosie plaats door stroming. Alleen is de factor erosie door stroming bijna gehalveerd ten opzichte van de eerdere berekening. Dit komt door de hogere weerstand tegen erosie van het zwak kleiige materiaal.

Factor	Erosie	Opmerking
Erosie BEM	21 m	Maximaal mogelijke erosie voor zand tijdens 10 hoogwaters
Erosie BSTEM	2	T = 20 hoogwater
Totaal:	23 m	

Tabel 11: Voorbeeld 10 hoogwaters en zandgrond.

Factor	Erosie	Opmerking
Erosie BEM	18 m	Maximaal mogelijke erosie voor zwakke klei tijdens 10 hoogwaters
Erosie BSTEM	1 m	T = 20 hoogwater
Totaal:	19 m	

Tabel 12: Voorbeeld 10 hoogwaters en zwakke klei.

Factor	Erosie	Opmerking
Erosie BEM	2 m	Maximaal mogelijke erosie voor klei tijdens 1 jaar
Erosie BSTEM	-	T = 20 hoogwater
Totaal:	2 m	

Tabel 13: Voorbeeld 10 hoogwaters en sterke klei.

⁶ Zie hoofdstuk 4

Wanneer de berekening wordt uitgevoerd voor de “meest gunstige” situatie, een situatie met stevige klei, valt de factor erosie door stroming compleet weg (zie tabel 13) de te verwachten erosie na 10 hoogwaters wordt dus compleet bepaald door de erosie door golfslag, en is in dit voorbeeld maximaal 2 meter.

7.4 Conclusie

Met de gegevens uit hoofdstuk 5 en 6 kan de deelvraag “hoe snel gaat de oevererosie in een deels onbeschermd oever” beantwoord worden. De gemaakte berekeningen kunnen niet voor een specifieke locatie zeggen hoeveel meter erosie er exact plaats zal vinden. Daarvoor is er niet genoeg onderzoek gedaan naar het kalibreren van de modellen. Wel kunnen de modellen een indruk geven van de maximaal optredende erosie in verschillende bodemtypes, onder de in hoofdstuk 4 gegeven afvoerreeds.

Hieruit volgt dat de erosie voornamelijk afhankelijk is van de golfslag. Deze erosie speelt voornamelijk tijdens de eerste twee jaar een heel belangrijke rol, maar zal daarna ook nog steeds een belangrijke factor zijn. Stroming zal alleen tijdens een min of meer extreem hoogwater erosie veroorzaken. En de hierdoor veroorzaakte erosie zal pas na de initiële erosie door golfslag een factor van betekenis worden. Daarom is in de tot nu toe uitgevoerde berekeningen erosie door stroming bijna niet aanwezig. Daartegen is de erosie door golfslag bepalend.

Ook kan opgemerkt te worden dat erosie een constant proces is, wat ondanks dat de erosiesnelheid jaarlijks minder wordt, er wel jaarlijks erosie zal plaatsvinden. Ook blijft jaarlijks de kans bestaan op een zeer extreem hoogwater, waardoor er veel meer materiaal zal eroderen dan vooraf verwacht. Daarom verdient het de aanbeveling om er altijd rekening te houden dat er een zeer extreem ($T = 1250$ jaar) hoogwater plaats kan vinden, en dat er dus de mogelijkheid bestaat dat de maximaal mogelijke erosie plaats zal vinden in dat jaar. Dit betekent dat wanneer de steilwand binnen de maximale erosieafstand voor een $T = 1250$ situatie van een object komt, bij zand bijvoorbeeld 5 meter (zie afbeelding 8). Dan moeten maatregelen worden getroffen om de erosie te stoppen, of dat er nieuw oevermateriaal aangebracht moet worden om de afstand van de steilwand tot het object te vergroten.

8 Conclusie

In dit rapport is geprobeerd een inzicht te geven in de erosiesnelheid van deels beschermde oevers van de Maas. Dit is gedaan met behulp van modellen. Door gebruik te maken van een veelheid aan gegevens met betrekking tot oevermaterialen is geprobeerd om voor zo veel mogelijk verschillende situaties een inzicht te kunnen geven in het verloop van de erosie.

8.1 Hoofdvraag

“Wat is de relatie tussen de mate van ontstening van rivieroevers, en de erosiesnelheid?”

Deze vraag kan goed beantwoord worden wanneer gekeken wordt naar de testen uitgevoerd met BEM, hoofdstuk 6. In dit hoofdstuk wordt de erosie ten gevolge van golfslag beschreven, waar tevens dieper wordt ingegaan op de variatie in oeverbescherming, ofwel de mate van ontstening van de oever. Te lezen is dat de mate van bescherming van grote invloed is op de mate van erosie door golfslag. Een reductie van 30% tot 55% kan bereikt worden door het laten doorlopen van de oeverbescherming tot stuwpeil (onder invloed van de in dit rapport gebruikte dataset). Hieruit kan dus opgehaald worden dat de erosie ten gevolge van golfslag beïnvloed wordt door de mate van ontstening.

Bij erosie door stroming is het verhaal net iets anders. Doordat de verdeling van schuifspanning op de oever onafhankelijk is van de situatie boven of onder een bepaald punt, is de erosie boven aan een steilwand onafhankelijk van de erosie onder aan de steilwand. Hierdoor heeft de mate van bescherming geen invloed op de mate van erosie boven aan de steilwand, of boven aan het oeverprofiel. Wel is de mate van oeverbescherming van invloed op de hoeveelheid materiaal dat weggenomen wordt door de stroming. Hoe meer oeverbescherming, hoe meer materiaal op zijn plaats blijft.

Geconcludeerd kan worden dat het laten zitten van meer oeverbescherming de erosie beperkt/ controleert. Het grootste effect heeft het laten zitten van de oeverbescherming tot het stuwpeil. Het door laten lopen van de oeverbescherming tot boven stuwpeil heeft ook nog effect, maar het effect is relatief minder dan het door laten lopen van de oeverbescherming tot stuwpeil.

8.2 Deelvragen

8.2.1 Welke processen zitten achter oevererosie?

In hoofdstuk 3 is te lezen dat erosiesnelheid bepaald wordt door de weerstand van het oevermateriaal tegen erosie (afkalfsterkte) en de kritieke schuifspanning. Wanneer de door stroming of golfslag uitgeoefende schuifspanning op het oevermateriaal groter wordt dan de kritieke schuifspanning van het oevermateriaal, zal het oevermateriaal gaan bewegen, en dus eroderen. Het materiaal kan onder invloed van schuifspanningen komen te staan door stroming of golfslag. Na het uitvoeren van testen met de gebruikte modellen is gebleken dat de erosie voornamelijk plaats vindt door golfslag veroorzaakt door scheepsbewegingen. Gebleken is dat voor rivierkilometer 171 stroming geen tot weinig invloed heeft op de erosie, althans tijdens min of meer normale stromingsomstandigheden.

8.2.2 Op welke locaties is momenteel vrije oevererosie gaande?

Zoals in hoofdstuk 2 te lezen vindt er momenteel erosie plaats op een groot aantal locaties in de Maas. Bij een deel van deze locaties vindt momenteel monitoring plaats voor de erosiesnelheid. Uit de beschikbare locaties is rivierkilometer 171 gekozen als “modellocatie”. Van deze locatie worden de

beschikbare oever- en waterstand gegevens gebruikt, en gecombineerd met verschillende bodemmateriaal gegevens.

8.2.3 *Hoe snel gaat de oevererosie in een onbeschermde oever*

In dit rapport is geen onderzoek gedaan naar erosie in compleet onbeschermde oevers. Er is onderzoek gedaan naar erosie in deels beschermde oevers. Hieruit valt op te maken dat de erosiesnelheid afhankelijk is van het oevermateriaal. Wel is te voorspellen wat de erosie zal zijn tijdens een periode na het ontsteden van de oever, zoals in hoofdstuk 7.3 te lezen is, varieert de maximale te verwachten erosie na 10 hoogwaterperioden (10 jaar) afhankelijk van de grondsoort tussen de 2 en 23 meter, waarbij bij er gemiddeld genomen ongeveer 15 meter erosie verwacht wordt in slechte klei.

8.2.4 *Welke oplossingen zijn beschikbaar voor het tegengaan van oevererosie*

Gekeken is naar erosiebeperking door het laten zitten van een deel van de oeverbescherming, en door beperking van de erosie door een groter afstand te creëren tussen de oever en langsvarende schepen. Beide methoden hebben effect op de grootste erosiefactor, erosie door golfslag.

Het laten zitten van een deel van de oeverbescherming kan een groot effect hebben op de erosiesnelheid, hoe meer oeverbescherming er blijft zitten, hoe minder momenten er zijn waarop er erosie door golfslag zal plaats vinden. En het vergroten van de afstand tussen de schepen en de oever levert een grote reductie van de golfslag op (zie hoofdstuk 5.3.3) waarmee ook direct de hoeveelheid erosie en de erosiesnelheid beperkt wordt. Wanneer er de ruimte is om de afstand tussen de schepen en de oever te vergroten kan dit zeker een goede mogelijkheid zijn om de erosie te beperken.

8.2.5 *Zijn de erosie beperkende maatregelen, en de methode voor het berekenen van de erosiesnelheid breder te gebruiken dan alleen bij de onderzochte locaties?*

Ondanks dat er niet gekeken is naar technische oplossingen om erosie tegen te gaan is er wel gekeken naar het tegen gaan van erosie door het ontwerp aan te passen. Deze methodes zijn wel bruikbaar op andere locaties.

Zoals in hoofdstuk 7.1 te lezen is, zijn de in dit rapport verkregen gegevens niet één op één bruikbaar op andere locaties buiten het stuwpand Grave. Wel is de gebruikte methode, het optellen van de resultaten van BEM en BSTEM, ofwel het optellen van de erosie door golfslag en stroming, zoals gebruikt in hoofdstuk 7.3 bruikbaar om te voorspellen wat de maximaal te verwachten erosie zal zijn na een bepaald aantal jaren. Ondanks dat de erosie enigszins overschat zal worden door gebruik te maken van deze methode, zal het gebruik maken van deze methode voor beleidsmakers en ontwerpers een handvat kunnen zijn om te bepalen hoeveel erosie op een bepaalde locatie op zal treden.

9 Aanbevelingen

9.1 Kader Richtlijn Water

De conclusie van dit rapport is dat het laten zitten van een deel van de oeverbescherming voordelig is voor het beperken /controleren van de erosie, en dat het effect van de oeverbescherming groter wordt naarmate de oever hoger beschermd is. In de inleiding is aangegeven dat het doel van het ontstensen van de oever natuurontwikkeling is, om te kunnen voldoen aan de kader richtlijn water (KRW). Er is niet onderzocht of dat met het laten zitten van een deel van de oeverbescherming er nog steeds vol-
daan kan worden aan de KRW. Hier kan zeker nog meer onderzoek naar gedaan worden.

9.2 Kalibratie

De gebruikte modellen zijn niet gekalibreerd voor de gebruikte oevers. Er is in dit rapport een inventarisatie gedaan van de gevoeligheden, door gebruik te maken van een grote hoeveelheid aan invoergegevens. Desondanks verdient het zeker de aanbeveling om te kijken naar de hoeveelheid van kalibratie van de modellen. Door de modellen te kalibreren kan er nog accurater berekend worden wat de te verwachten erosie is.

Daarnaast kan het ook nuttig zijn om de afvoerreeksen te kalibreren, en na te gaan wat de ideale reeksen zijn om te gebruiken als belasting. In dit rapport is uit gegaan van de $T = 20$ en $T = 1250$ reeks voor de erosie door stroming, en zijn deze volgens het in hoofdstuk 7.3 bij elkaar opgeteld. Er is verder geen onderzoek gedaan naar de relatie tussen de verschillende hoogwatergebeurtenissen, en hoe op de meest realistische manier een verdeling in de afvoerreeksen gemaakt kan worden.

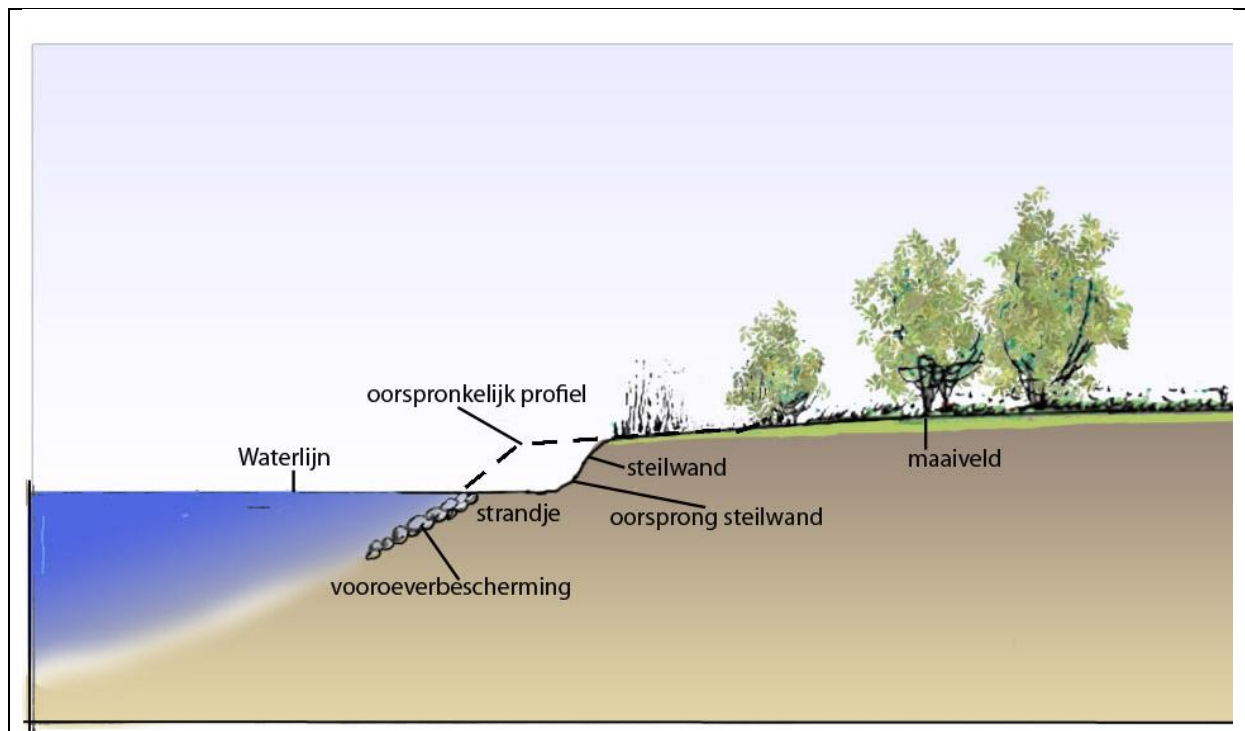
9.3 Samenvoegen golfslag en stroming

Voor dit rapport zijn twee modellen gebruikt om de erosie mee te bepalen, de resultaten worden bij elkaar opgeteld om tot een volledig resultaat te komen. Deze methode levert waarschijnlijk een overschatting op in de hoeveelheid erosie. Dit kan voorkomen worden door een model op te stellen waarin de golfslag en de stroming bij elkaar opgeteld worden. BSTEM leent zich ervoor om een module in te bouwen zodat de stroming én de golfslag in een model berekend kunnen worden. Het kan zijn dat het model wat momenteel in ontwikkeling is bij Deltares stroming en golfslag meeneemt voor het bepalen van de erosiesnelheid, in dat geval kan er gekeken worden naar dit model.

9.4 Erosie beperkende maatregelen

In dit rapport is wegens tijdgebrek geen onderzoek gedaan naar erosie beperkende maatregelen. Er moet nog in een volgende studie onderzoek gedaan worden naar mogelijkheden om de erosie te beperken. Om erosie tegen te gaan kan gekeken worden naar twee verschillende principes, de traditionele “harde” bescherming van bijvoorbeeld stortsteen, basaltblokken of schanskorven. Of het weghouden van de stroming en golfslag op / langs de oever met bijvoorbeeld een vooroeverdam.

Begrippenlijst



Afbeelding 9: Overzicht van de gebruikte termen betreffende de oever.

μ	Pa	viscositeit medium (water)
C	-	Chezy waarde
c_f	-	wrijvingscoëfficiënt (tussen stroming en oever)
C_u	Pa	ongedraineerde schuifspanning
C_v	m^2/s	consolidatie coëfficiënt
d	m	D_{60} niet cohesieve sedimentfactor oevermateriaal
D_{60}	m	Diameter van het materiaal dat door 40% van het materiaal wordt overschreden
E	m/s	Coëfficiënt voor de gevoeligheid voor erosie (afkalfsterkte) m/s
g	m/s^2	Gravitatieversnelling
g	m/s^2	gravitatieversnelling
H_s	m	golfhoogte
P	-	Porositeit van het materiaal
p	$M^{0.22}$	Coëfficiënt voor een parabolisch strandje
ϕ	°	hoek van de steilwand
r	m	de radius van het vallende deeltje

SWL	m +NAP	Standard water line. Waterstand
T	s	Golfperiode
t	s	tijd
u_b	m/s	bodemsnelheid
u_c	m/s	Laterale stroomsnelheid
u_r	m/s	resulterende snelheid met golven en stroming
v	m/s	Erosiesnelheid van de oever
α	°	hoek van de vooroever
ρ	kg/m ³	massa water
ρ_f	kg/m ³	massa medium (water)
ρ_p	kg/m ³	absolute massa deeltje (zand)
ω	1/s	hoekfrequentie golven = $2\pi/T$
τ_c	Pa	Kritische schuifspanning van het materiaal
τ_w	Pa	Schuifspanning ten gevolge van de stroming
τ_{cr}	Pa	Kritische schuifspanning
κ	-	Von Karmann constante
L_e	m	lengte erosie.

Bronnenlijst

Bronnenlijst

Bijker, E.W., 1967 Some considerations about Scales for coastal Models with moveable Bed. Delft Hydraulics, publ.nr. 50

Wood et al, 2001 Bank-toe processes in incised channels: the role of apperent cohesion in the entrainment of failed bank material. Hydrological Processes, Wiley Vol. 15pp. 39-61

Crosato, Alessandra, 2008 Analysis and modeling of river meandering

CROW, 2010 Standaard RAW Bepalingen 2010

Vellinga, 1986. Beach and Dune Erosion during Storm Surges. Proefschrift aan de TU Delft

Partheniades, E. 1965. Erosion and deposition of cohesive soils, Journal of Hydraulic Engineering

Lee K L Seed H B, 1967. Drained Strength Characteristics of sands

Afbeeldingen

Afbeelding 1: Arcadis 2009, Natuur(vriende)lijke maasoevers Eijsden-Ammerzoden, verkenning kansrijke projecten KRW. Kenmerk: C03021/OM7/200033/ws

Afbeelding 2: Arcadis 2009, Natuur(vriende)lijke maasoevers Eijsden-Ammerzoden, verkenning kansrijke projecten KRW. Kenmerk: C03021/OM7/200033/ws

Afbeelding 3: Google earth, geraadpleegd mei 2012

Afbeelding 5: Rijkswaterstaat

Afbeelding 6: Schiereck, Gerrit J. 2001 Introduction to bed, bank and shore protection

Grafieken

Grafiek 1: Schiereck, Gerrit J. 2001 Introduction to bed, bank and shore protection

Modellen

Bank Erosion Model (BEM):

Bron: Deltares

Bank Stability and Toe Erosion Model

Bron: United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service.

Internet bronnen

<http://bit.ly/KaderRichtlijnWater>:

<http://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/wetgeving-beleid/kaderrichtlijn-water/uitvoering/maas/> (mei 2012)

<http://bit.ly/Rivierkilometer171>:

<http://maps.google.com/maps?q=51.755621,5.800095&ll=51.754134,5.802155&spn=0.068009,0.110378&num=1&t=h&z=13> (mei 2012)

<http://bit.ly/N3aUQv>:

<http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=5044> (mei 2012)

<http://bit.ly/Maaswerken>:

http://www.rijkswaterstaat.nl/water/plannen_en_projecten/vaarwegen/maas/maas_maaswerke_n/ (mei 2012)