

Eindrapport

MORFODYNAMIEK VAN DE BOVEN-SLINGE

EEN BRON VAN LEVEN



Door:
Raymond Huisstede

Eindrapport

INZICHT IN MORFODYNAMIEK VAN DE BOVEN-SLINGE

EEN BRON VAN LEVEN

Auteur	: Raymond Huisstede
Versie	: Eindversie
Plaats	: Doetinchem
Datum	: juni 2018
Studierichting	: Land- en watermanagement, Van Hall Larenstein
Module	: Afstudeeropdracht
Opdrachtgever	: Gerry Roelofs, Hydrologisch Adviseur (Specialist planvorming)
Organisatie	: Waterschap Rijn en IJssel
Begeleider VHL	: Karen Leever

Voorwoord

Voor u ligt het rapport 'Inzicht in de morfodynamiek van de Boven Slinge: Plan van aanpak.

Het afgelopen half jaar ben ik bezig geweest met een modelstudie om inzicht te krijgen in de morfodynamiek van de Boven Slinge. Het doel hiervan was een bruikbaar en betrouwbaar model te krijgen, zodat daarmee duurzame beheersmaatregelen getroffen kunnen worden. De studie werd verricht in het kader van het afstudeeronderzoek voor de opleiding Land- en Watermanagement aan de hogeschool Van Hall Larenstein. De opdracht is uitgevoerd binnen de afdeling Advies- en Strategie van het Waterschap Rijn en IJssel in Doetinchem.

In de Boven Slinge zijn in het verleden veel beekherstelmaatregelen uitgevoerd, echter het is niet altijd even duidelijk hoe de morfodynamiek van de beek hierop reageert. Doordat het een actueel thema is en er veel interacties van processen plaatsvinden, was ik meteen enthousiast over dit onderzoek en heb ik het met veel plezier uitgevoerd. Het was een leerzaam en mooi onderzoek binnen een uniek stroomgebied. Ik heb met dit onderzoek ook de sfeer mogen proeven bij een waterschap en de behulpzaamheid en het enthousiasme van collega's mogen ervaren. Uiteindelijk kijk ik met tevredenheid terug op het resultaat en op een periode die staat voor het afsluiten van een tijd waarin heel veel is gebeurd, zowel beroepsmatig als op prive-vlak.

Ik wil de collega's bedanken voor de tijd die ze hebben genomen voor het beantwoorden van mijn vragen en het rondleiden langs de Boven Slinge. Ik wil mijn begeleidster van school, Karen Leever, bedanken voor de begeleiding, ondersteuning en haar enthousiasme. Louisa Remesal, omgevingsmanager bij Waterschap Rijn en IJssel, wil ik bedanken voor het uitzetten van mijn vraag voor een afstudeeropdracht binnen het waterschap.

Tenslotte wil ik vooral mijn begeleider Gerry Roelofs, specialist planvorming binnen Waterschap Rijn en IJssel, bedanken voor de mogelijkheid die hij heeft gegeven, deze mooie opdracht te mogen uitvoeren. Uiteraard dank ik hem ook voor zijn begeleiding, samenwerking en feedback.

Raymond Huisstede

Doetinchem, 7 juni 2018

Samenvatting

Aanleiding/belang

In het recente verleden hebben er diverse beekherstelmaatregelen plaatsgevonden, gebaseerd op de pijlers verbeteren van de ecologische conditie, verbeteren van de hydrologische toestand (vasthouden-bergen-afvoeren) en mogelijkheden voor recreatie en toerisme. Bij de uitvoering van de maatregelen was het streven naar een nieuw dynamisch evenwicht, aangepast aan de actuele toestand en het functioneren van het landschap en zodanig dat de beek zichzelf in de toekomst duurzaam in stand kan houden

Probleem- en doelstelling

Het grote verhang en de sterke afvoerdynamiek van deze beek zorgen, samen met de recente maatregelen voor beekherstel, voor continue morfologische processen. Uitgangspunt is het beheer te extensiveren, maar indien nodig wil men in kunnen grijpen volgens het “building with nature”-principe met zo min mogelijk nadelige effecten voor de ecologie. Dit geldt vooral voor Natura2000-gebied Bekendelle. Het probleem daarbij is echter dat er vooralsnog onvoldoende zicht is op de morfodynamiek om een goed plan van aanpak te kunnen maken.

Het doel van dit onderzoek is om te bekijken of aan de hand van theoretische modellen een betrouwbaar beeld van de daadwerkelijke morfodynamiek te krijgen is, zodat op basis van deze modellen een plan van aanpak gemaakt kan worden.

Werkwijze

Om inzicht te verkrijgen in de morfodynamiek van de Boven Slinge zijn eerst modellen gemaakt die dit beschrijven. De parameters die hiervoor nodig zijn, zijn bepaald per (leiding)vak en er is uitgezocht hoe aan input voor deze parameters te komen. De parameters zijn verwerkt in GIS en Excel. De berekeningen zijn uitgevoerd in Excel, waarna de resultaten zijn geëxporteerd naar GIS. Resultaten van de modellen zijn gepresenteerd in grafieken, diagrammen en kaarten vanuit GIS en Excel en toegelicht in de tekst. Vervolgens is gekeken of de resultaten van de modellen konden worden geverifieerd aan de hand van waarnemingen en metingen in het projectgebied. De combinatie van deze twee gegevens leidt vervolgens tot een validatie van de modellen

Conclusie

De conclusie luidt dat de theoretische modellen voor een deel zeker bruikbaar zijn om de morfodynamiek en diens eigenschappen te voorspellen, maar dat de meer onvoorspelbare natuurlijke factoren die de processen meer dynamisch maken, steeds moeten worden meegewogen en geanalyseerd om duurzame beheersmaatregelen te kunnen treffen.

Enkel en alleen op het theoretische model is een dergelijk plan slechts beperkt van toepassing. Het is daarom van belang dat bij een herinrichting van de Boven Slinge, goed wordt gevolgd wat er op morfologisch vlak gebeurt. Immers de voorspelbaarheid van de morfologische veranderingen die zullen volgen uit een dergelijke herinrichting is beperkt.

Inhoud

Voorwoord	3
Samenvatting	4
1 INLEIDING	7
1.1 AANLEIDING	7
1.2 KADER EN PROBLEEMSTELLING	7
1.3 DOEL EN BEOOGD RESULTAAT	7
1.4 HOOFD- EN DEELVRAGEN	7
1.5 METHODE	8
1.6 AFBAKENING EN BEPERKINGEN	8
1.7 LEESWIJZER	8
2 BOVEN SLINGE	10
2.1 ALGEMEEN	10
2.2 HOOGTE, BODEM EN GEOMORFOLOGIE	10
2.3 VERANDERINGEN(/BEHEER)	11
3 MODELLERING, VERIFICATIE EN VALIDATIE	13
3.1 MODELLERING	13
3.1.1 GEULTYPE	13
3.1.2 SEDIMENTTRANSPORT	15
3.1.3 TRANSPORTCAPACITEIT EN NETTO EROSIE/ SEDIMENTATIE	16
3.1.4 BEDDINGVORM	18
3.2 VERIFICATIE	19
3.2.1 WAARNEMINGEN	19
3.2.2 METINGEN	23
3.3 VALIDATIE	23
4 MODEL GEULTYPE	24
4.1 UITGANGSPUNTEN EN RESULTATEN	24
4.1.1 UITGANGSPUNTEN	24
4.1.2 RESULTATEN	24
4.2 VERIFICATIE	26
4.2.1 WAARNEMINGEN	26
4.2.2 METINGEN	27
4.3 VALIDATIE	27
5 MODEL SEDIMENTTRANSPORT	30
5.1 UITGANGSPUNTEN EN RESULTATEN	30
5.1.1 UITGANGSPUNTEN	30
5.1.2 RESULTATEN	30
5.2 VERIFICATIE	31
5.3 VALIDATIE	31
6 MODEL TRANSPORTCAPACITEIT, NETTO EROSIE/ -SEDIMENTATIE	33

6.1	UITGANGSPUNTEN EN RESULTATEN	33
6.1.1	UITGANGSPUNTEN	33
6.1.2	RESULTATEN	33
6.2	VERIFICATIE	35
6.2.1	WAARNEMINGEN	35
6.2.2	METINGEN	36
6.3	VALIDATIE	38
7	MODEL BEDDINGVORM	40
7.1	UITGANGSPUNTEN EN RESULTATEN	40
7.1.1	UITGANGSPUNTEN	40
7.1.2	RESULTATEN	40
7.2	VERIFICATIE	41
7.2.1	VERBAND WAARNEMINGEN MET MODEL	41
7.2.2	VERGELIJKING MODEL EN WAARNEMINGEN	41
7.3	VALIDATIE	41
8	CONCLUSIE	42
9	AANBEVELINGEN	45
Bijlage 0.	REFLECTIE	47
Bijlage 1.	OVERZICHTSKAART	49
Bijlage 2.	RUIMTELIJKE ANALYSE	50
	Geomorfologie en bodem	50
	Historie en topografie	51
Bijlage 3.	ONDERSCHRIJDINGSKANS AFVOER OVERLAAT BERENDSCHOT	52
Bijlage 4.	DATA GEULTYPE	53
Bijlage 5.	DATA SEDIMENTTRANSPORT	54
Bijlage 6.	DATA TRANSPORTCAPACITEIT	55
Bijlage 7.	DATA BEDDINGVORM	56
Bijlage 8.	GEULTYPE	57
Bijlage 9.	SEDIMENTTRANSPORT	59
Bijlage 10.	BEDDINGVORM	61
Bijlage 11.	WAARNEMINGEN	63
Bijlage 12.	ZANDTONG BIJ STEMERDINKSWEG	65
Bijlage 13.	WIJZINGEN PROJECT "BURLOSEWEG"	68
Bijlage 14.	SOBEK LENGTEPROFIELEN	69
Bijlage 15.	LITERATUURLIJST	70

1 INLEIDING

1.1 AANLEIDING

Natura2000, KRW-doelstellingen en WB21 hebben ertoe geleid dat er recent maatregelen zijn getroffen in de Boven Slinge met als algeheel doel: beekherstel. Deze maatregelen zijn erop gericht de beek en het beekdal terug te brengen in een nieuw dynamisch evenwicht, aangepast aan de actuele toestand en het functioneren van het landschap en zodanig dat de beek zichzelf duurzaam in stand kan houden.

De maatregelen stoelen op een integrale aanpak, gebaseerd op de pijlers:

1. Verbeteren van de ecologische conditie van het beek- en beekdalecosysteem
2. Verbetering van de hydrologische toestand van het watersysteem (trits vasthouden-bergen-afvoeren)
3. Nieuwe mogelijkheden voor recreatie en toerisme

Beekherstel houdt meestal in dat de bedding een nieuw ontwerp krijgt, waarbij deze doorgaans ondieper wordt en een grotere lengte (en dus een meer slingerend verloop) krijgt. Er treedt een verandering in de morfodynamiek op, waarbij afkalving van de buitenbocht optreedt en aanzanding in de binnenbocht.

1.2 KADER EN PROBLEEMSTELLING

De Boven Slinge is een typische plateaurandbeek met een sterk verhang en grote afvoerdynamiek. Hierdoor inundeert de beek jaarlijks één of meerdere keren, ondanks haar diepe insnijding in het landschap. Dat hoort bij deze beek en inundaties blijven beperkt tot een relatief smalle zone in het beekdal. Over grote delen van het traject tussen de N318 bij Miste tot aan de Duitse grens stroomt de beek door beekbegeleidende bossen.

Het grote verhang en de sterke afvoerdynamiek van deze beek zorgen, samen met de recente maatregelen voor beekherstel, voor continue morfodynamische processen. Erosie en sedimentatie zijn dan ook een belangrijk onderdeel van de ontwikkeling van de beek. Erosie zorgt voor insnijding en lagere waterstanden met gevolgen voor het grondwater. Daarentegen kan aanzanding de inundatiefrequentie juist vergroten en de (piek)waterstanden verhogen, waardoor wateroverlast vaker aan de orde is.

Uitgangspunt is het beheer te extensiveren, maar indien nodig wil men in kunnen grijpen volgens het “building with nature”-principe met zo min mogelijke nadelige effecten voor de ecologie. Dit geldt vooral voor Natura2000-gebied Bekendelle. Het probleem daarbij is echter dat er vooralsnog onvoldoende zicht is op de morfodynamische processen om een goed plan van aanpak te kunnen maken.

1.3 DOEL EN BEOOGD RESULTAAT

Doel van het onderzoek is inzicht te krijgen in de morfodynamiek van de Boven Slinge en welke eigenschappen hierin karakteristiek zijn. Dit inzicht is getracht te verkrijgen door het opzetten van modellen die de morfodynamiek beschrijven van de Boven Slinge en het doen van een waardebeoordeling van de uitkomsten.

Het resultaat is een inschatting van de bruikbaarheid en betrouwbaarheid van de modellen. Ook is ervaring opgedaan in het verkrijgen en verwerken van gegevens, evenals in hoe en hoeverre de resultaten te controleren zijn.

Het inzicht dient dan als basis voor verdere monitoring om tijdig te kunnen sturen, indien zich een ongewenste situatie voor zou kunnen doen. Ook gevolgen van ingrepen in het gebied moet hiermee beter te voorspellen zijn. Voorbeelden van sturende maatregelen voor duurzaam beheer kunnen dan zijn: tijdig afvangen van sediment bij een ingreep, aanbrengen van verstoringen en aanbrengen van begroeiingen op de oevers.

1.4 HOOFD- EN DEELVRAGEN

De probleemstelling, doel en beoogd resultaat zijn vertaald naar een hoofd- en vier deelvragen. Deze worden in verschillende fasen van het onderzoek beantwoord.

Hoofdvraag

Wat zijn de karakteristieke eigenschappen van de Boven-Slinge met betrekking tot de morfodynamiek en zijn deze eigenschappen te voorspellen door een model, dusdanig dat op basis van dit model duurzame beheersmaatregelen getroffen kunnen worden?

Deelvragen

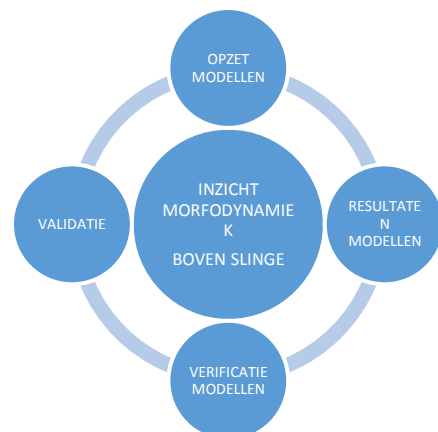
1. Hoe is de morfodynamiek ruimtelijk te modelleren?
2. Hoe is het model te verifiëren: welke veldwaarnemingen en metingen zijn hiervoor geschikt?
3. Voldoen de modellen en zijn ze betrouwbaar?
4. Welke karakteristieke eigenschappen komen uit de geverifieerde modellen naar voren?

1.5 METHODE

Om inzicht te verkrijgen in de morfodynamiek van de Boven Slinge zijn eerst modellen gemaakt die dit beschrijven. De parameters die hiervoor nodig zijn, zijn bepaald per (leiding)vak en er is uitgezocht hoe aan input voor deze parameters te komen.

De parameters zijn verwerkt in GIS en Excel. De berekeningen zijn uitgevoerd in Excel, waarna de resultaten zijn geëxporteerd naar GIS. Resultaten van de modellen zijn gepresenteerd in grafieken, diagrammen en kaarten vanuit GIS en Excel.

De resultaten worden geverifieerd door waarnemingen en metingen in het projectgebied. Bij de validatie is de waarde van de modellen beoordeeld.



Figuur 1 Methode van onderzoek

1.6 AFBAKENING EN BEPERKINGEN

De modellen hebben betrekking op het stroomgebied Boven Slinge van de rijksgrens tot zandvang Miste. Bij verificatie van de modellen ligt de focus op het stroomgebied bovenstrooms van de Bekendelle, aangezien recent onderzoek is gedaan naar de morfodynamiek vanaf watermolen Berenschot tot vispassage Broekmolen (Klop, 2017).

De modellering beperkt zich tot de Boven Slinge en houdt geen rekening met zij-instroom van sediment uit beken en/of afstroming van oppervlakkige oevermateriaal. Dit omdat de hoeveelheid sediment vanuit zijbeken onbekend is en afstroming van oppervlakkig oevermateriaal naar schatting beperkt is en tevens niet in de gebruikte wetenschappelijke formules voor sedimenttransport worden meegenomen.

Als uitgangspunt voor het onderzoek wordt het handboek "Geomorfologisch Beekherstel" (Makaske, B.; Maas, G., 2015) gebruikt. Formules die in dit handboek staan, worden gebruikt in het onderzoek, tenzij er inhoudelijke redenen zijn om hiervan af te wijken.

1.7 LEESWIJZER

Het rapport is als volgt opgebouwd. Na de algemene inleiding in hoofdstuk 1 volgt een introductie van de rivier de Boven Slinge in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 worden de modellen uiteengezet die de morfodynamiek van de Boven Slinge beschrijven, evenals de methode van verificatie en de validatie van deze modellen. Het uiteenzetten van de modellen gebeurt door het geven van de beschrijving, op welke vergelijking het model gebaseerd is en de parameters die hierin van belang zijn.

De daarop volgende hoofdstukken 4 tot en met 7 hebben dezelfde opbouw en gaan in op de afzonderlijke modellen. De uitgangspunten van het model en de resultaten worden omschreven. Deze resultaten worden onder de paragraaf verificatie vergeleken met de waarnemingen en metingen die gedaan zijn in het veld. Elk hoofdstuk wordt afgesloten met een validatie van de modellen om een uitspraak te kunnen geven over de bruikbaarheid en betrouwbaarheid van deze modellen.

In hoofdstuk 8 Conclusie worden de hoofd- en deelvragen beantwoord. In hoofdstuk 9 worden tenslotte een aantal aanbevelingen gedaan die naar aanleiding van het onderzoeksrapport zijn geformuleerd voor toekomstig onderzoek naar de morfodynamiek van de Boven Slinge en het formuleren van een goed plan van aanpak.

Er zijn diverse bijlages opgenomen achter het rapport, waaronder de reflectie. U wordt met name gewezen op bijlage 1, waarin een kaart is opgenomen met daarop de diverse plaatsaanduidingen. Deze plaatsaanduidingen worden met regelmaat in de tekst genoemd en geven een beter beeld van hoe en waar de bevindingen te plaatsen in de Boven Slinge.

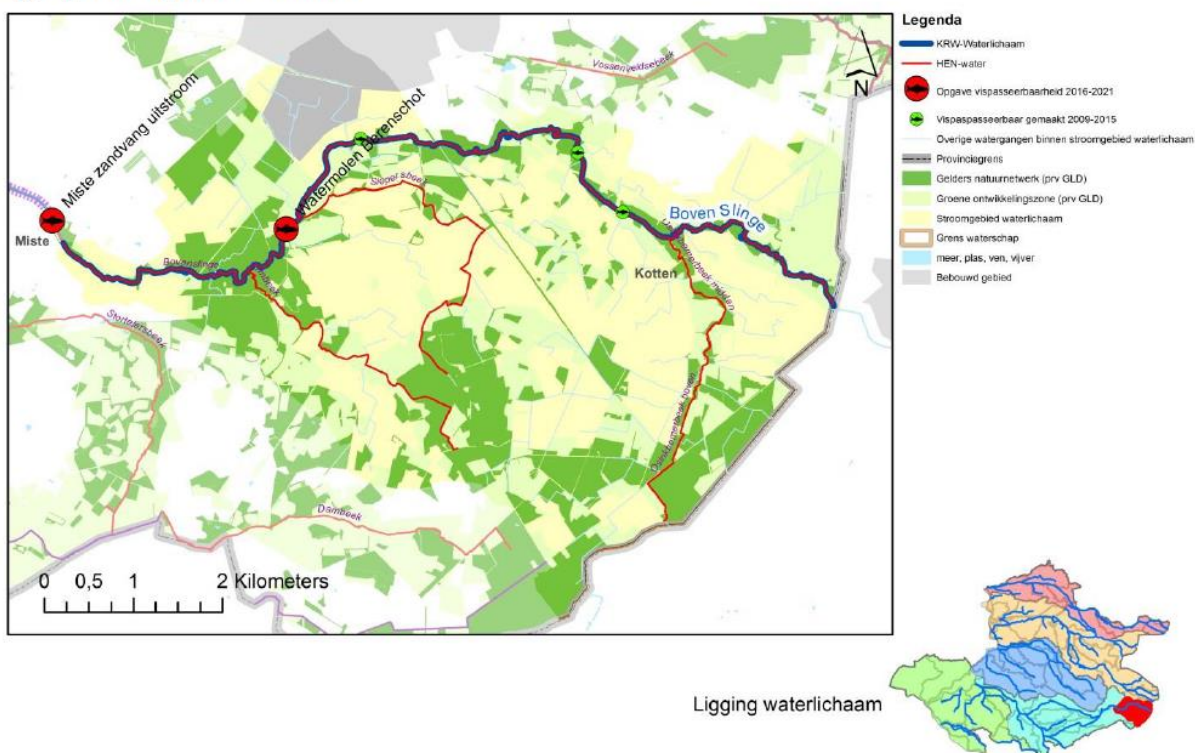
2 BOVEN SLINGE

Dit hoofdstuk geeft een algemene beschrijving van het projectgebied en gaat daarnaast in op de a-biotiek en het beheer. Daarmee zijn de volgende hoofdstukken in een context te plaatsen.

2.1 ALGEMEEN

De Boven Slinge ontspringt ten oosten van Sudlohn in Duitsland en stroomt bij Oeding over de grens naar Miste en mondt uiteindelijk via de Bielheimerbeek uit op de Oude IJssel. Het traject bovenstrooms van de Misterweg is tot aan de grens met Duitsland 12,5 km lang en heeft een stroomgebied van ca. 3800 ha., waarvan 2915 ha. in Nederland. Tevens maakt het Natura2000 gebied de Bekendelle hiervan deel uit. Het waterlichaam behoort tot het waterlichaam type R5: langzaam stromende middenloop/benedenloop op zand en is volledig in beheer bij het Waterschap Rijn en IJssel.

Ligging en toegekende functies



Figuur 2 Stroomgebied Boven Slinge (Waterschap Rijn en IJssel, 2016)

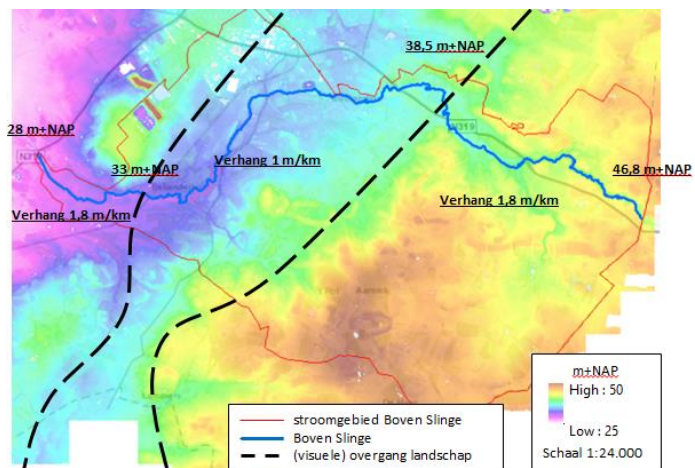
De Boven Slinge is een vrij meanderende beek die grotendeels door bos loopt. Op bepaalde trajecten grenst cultuurland aan de beek. Er is in het algemeen een brede variatie aan structuren in de vorm van dood hout, slib- en detritusbanken en stroomkuilen. In gemiddelde jaren heeft de beek jaarrond afvoer.

2.2 HOOGTE, BODEM EN GEOMORFOLOGIE

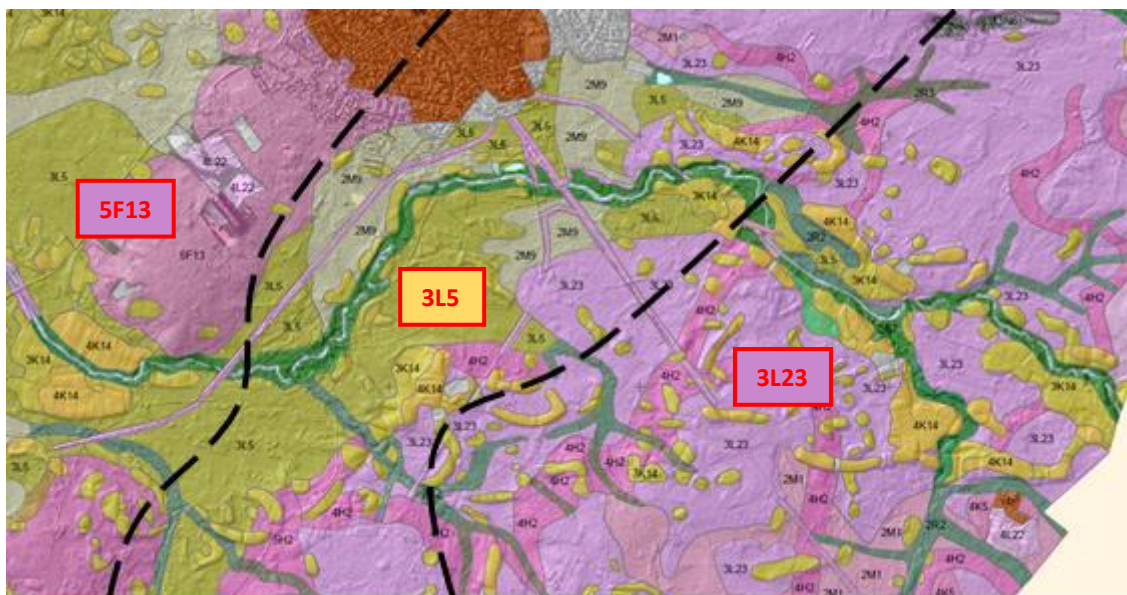
De eigenschappen van de Boven Slinge wordt, naast de menselijke ingrepen in de beek, vooral bepaald door het landschap waar het in stroomt. Zo is een indicatie voor het verhang en korrelgrootteverdeling af te leiden door de hoogtekaart, geomorfologische- en bodemkaart (zie bijlage 2) te bestuderen.

Bij het lezen van de hoogtekaart van rechts naar links, stroomt de Boven Slinge vanaf een hoger gelegen landschap door een lager gelegen “dal”, waarna het een landschap doorsnijdt dat weer hoger ligt. Een zelfde onderscheid is te maken op de geomorfologische kaart, van links naar rechts: plateau- en terrassenlandschap met vereffeningsrest-welvingen, dekzandruglandschap met vooral ruggen en een plateau-achtige vereffeningsrest waar de Boven Slinge doorheen snijdt.

Op figuur 3 en 4 is deze driedeling gemaakt door gebruik van stippellijnen. Bij de snijpunten van deze lijnen met de Boven Slinge is de hoogte van het omringende landschap bepaald. Het verhang is dan te berekenen door het verschil in hoogte te delen door de lengte van afzonderlijke delen van de beek (achtereenvolgens van rechts naar links ca. 4634, 6750 en 1900). Daarmee kent de Boven Slinge met 1,8 m/km een sterk terrein-verhang voor het eerste en laatste traject, met daartussen een traject waar het een lager terrein-verhang van 1 m/km heeft.



Figuur 3 Hoogtekaart van het stroomgebied van de Boven Slinge met twee visuele overgangen



Figuur 4 Geomorfologische kaart Boven Slinge gelegen in landschap met overgangen van plateau- en terrassenlandschap (3L23) naar dekzandlandschap (3L5) en plateau-achtige vereffeningsrest (5F13)

Op de bodemkaart 1:10.000 is te zien dat de Boven Slinge overwegend stroomt door zandige gronden als de beekeerdgronden (pZg), gooreerdgronden (pZn) en gronden van rivierklei, zoals poldervaag- of leek-/woudeerdgronden (resp. Rn en pRn).

De zandige gronden hebben een textuur van fijn, leemarm en zwak lemig zand tot fijn, lemig zand. Het heeft een zandfractie (M50) van 50-210 micron en een leemfractie tussen 10-50%.

2.3 VERANDERINGEN(/BEHEER)

De belangrijkste recente verandering (2015) in de Boven Slinge is de herinrichting bij de Burloseweg (zie bijlage 13) en benedenstrooms tussen de Kottenseweg-Stemerdingweg. Hierbij zijn een tweetal stuwen verwijderd, een voorde van riffles gemaakt en een tweetal slingers aangebracht. Later is er nog een zandvang (verbreding van de beek) gemaakt om mogelijk vrijgekomen zand van de herinrichting op te vangen.

Op een aantal trajecten zijn de oevers verhard met stortsteen of schanskorven. Stuw Berenschot (zie bijlage 1 overzichtskaart) is vispasseerbaar gemaakt.

In 2016 is de stuw en het watermolencomplex Den Helder (zie bijlage 1) grondig gerenoveerd en gerestaureerd. Daarbij is de oude stuw (een onderdoorlaat) vervangen door een klepstuw en vispasseerbaar gemaakt via de Losbeek.

Hiervoor zijn twee vistrappen (ca.1995) aangelegd bij Broekmolen en verder stroomafwaarts bij Vreehorstweg. Daar is later nog een extra trede aangelegd (2006) (zie bijlage 1).

Tot slot is de Bekendelle sinds 2010 aangewezen als Natura2000-gebied, hetgeen andere eisen- en voorwaarden stelt aan het beheer. Om beheermaatregelen uit te voeren dient er op 1 juli 2019 een integraal uitvoeringsplan te leggen dat uiterlijk op 1 juli 2021 is gerealiseerd.

3 MODELLERING, VERIFICATIE EN VALIDATIE

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op vier modellen die de morfodynamiek van de Boven Slinge per (leiding)vak beschrijven aan de hand van kenmerken en waarom voor deze modellen is gekozen.

Het eerste model is “Geultype”, hiervan is de morfodynamiek vooral zichtbaar in het geulpatroon. Het tweede model “Sedimenttransport”, beschrijft of beddingmateriaal wel/niet in beweging komt. De mate waarin het transport, en daarmee morfodynamiek, op kan treden wordt beschreven door het derde model “Transportcapaciteit”, waarvan, door een interpretatie te doen, een afgeleide is gemaakt voor netto erosie/sedimentatie. Het vierde model “Beddingvorm” is een initiator voor het verleggen van de beek.

Bij elk model hoort, vanuit de literatuur (Makaske, B.; Maas, G., 2015), een reeds bestaande wetenschappelijke vergelijking, opgebouwd uit parameters. In dit hoofdstuk wordt uitgelegd hoe, specifiek voor de Boven Slinge, aan deze parameters is gekomen.

3.1 MODELLERING

3.1.1 GEULTYPE

De morfodynamiek uit zich in het patroon van de stroomgeul en is te verdelen in 3 basistypen van geulpatronen: recht, meanderend en vlechtend. Deze hebben ieder een eigen spectrum van stromingsenergie waarbinnen ze zich ontwikkelen met een eigen vorm die kenmerkend is voor het type geulpatroon.

3.1.1.1 BESCHRIJVING

Lateraal stabiele geultypen hebben een lage stromingsenergie en zijn relatief smal en diep en hebben steile oevers, veelal gevormd in kleiig/lemig sediment of veen. Ze veranderen nagenoeg niet in loop van de tijd en banken ontbreken.

Meanderende geultypen hebben een hogere stromingsenergie en juist wel banken, waardoor de stroomdraad zich richting een oever verplaatst. Hierdoor ontstaat er in de bochten erosie in de buitenbocht en sedimentatie in de binnenbocht en heeft de geul een asymmetrisch dwarsprofiel. Het dwarsprofiel heeft een steile oever in de buitenbocht, waarna het geleidelijk oploopt richting de binnenbocht. Gemiddeld is de geul breder en ondieper dan rechte geulen.

Bij een nog verdere toename in stromingsenergie ontstaan er vlechtende geultypen. Deze kenmerken zich door meerdere stroomdraden, waarbinnen zich banken ontwikkelen. Hierdoor heeft het meer ruimte nodig dan meanderende geultypen en is de geul nog breder en ondieper (Makaske, B.; Maas, G., 2015).

3.1.1.2 DIAGRAM EN VERGELIJKING

De geultypen zijn uit te zetten in een stabiliteitsdiagram, waarin een stromingsenergie-parameter wordt uitgezet tegenover een sedimentparameter voor het type materiaal. De stromingsenergie is een combinatie van geulvullende afvoer en de terreinhelling en wordt hier het potentiële specifieke stromingsvermogen genoemd.

$$\omega_{pv} = \frac{\rho g Q S_v}{W_r}, \text{ waarbij}$$

ω_{pv} = potentiële specifieke stromingsvermogen (W/m^2);

ρ = dichtheid van water (kg/m^3);

g = zwaartekrachtsversnelling (m/s^2);

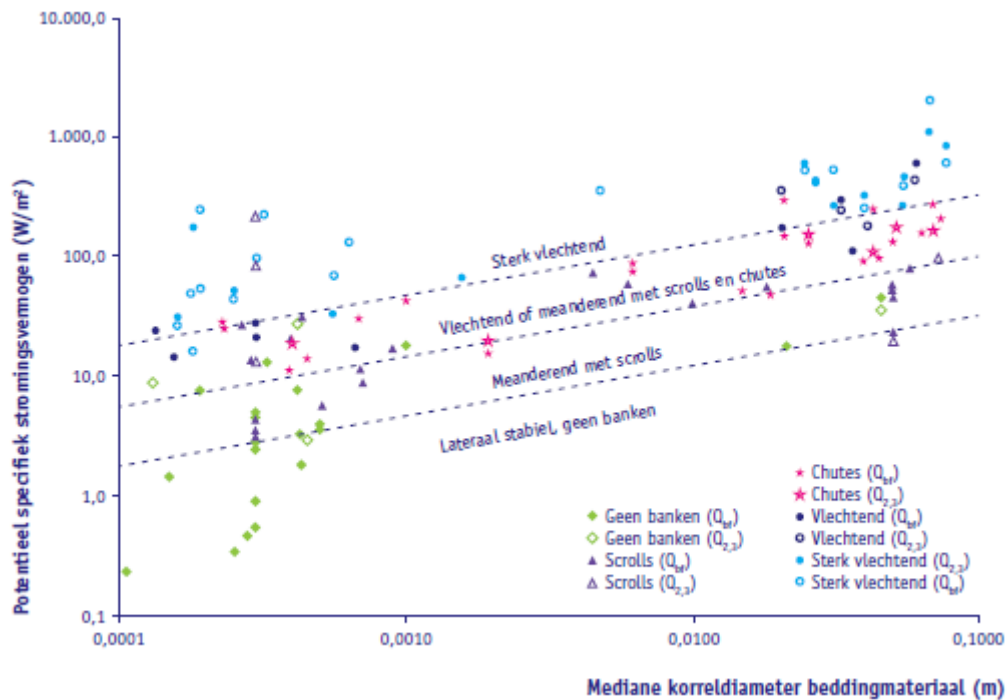
Q = dominante of geulvormende afvoer (m^3/s);

S_v = helling van dal of vlakte (–);

W_r = breedte van een referentiegeul (m –); met

$W_r = 4,7 * \sqrt{Q}$, voor zandig beddingmateriaal ($D_{50} < 2mm$) of,

$W_r = 3 * \sqrt{Q}$, voor grindig beddingmateriaal ($D_{50} > 2mm$)



Figuur 5 Stabiliteitsdiagram voor de geultype, waarbij de sturende factoren zijn gevat in het potentiele specifieke stromingsvermogen en de mediane korreldiameter

De lijnen zijn bepaald door een groot aantal punten, waarvan tevens de geomorfologie bekend is, in het diagram te clusteren. De punten vertegenwoordigen geulen die in natuurlijk evenwicht zijn (sedimentaanvoer en -afvoer zijn gelijk). Hierbij ontstaan velden die de verschillende geultypen lateraal stabiel (geen banken), meanderend met banken en vlechtend met banken vertegenwoordigen. De lijnen moeten gezien worden als ondergrens voor een specifiek geultype en minimaal benodigde stromingsenergie bij een mediane korreldiameter beddingmateriaal. Wil een beek kunnen meanderen heeft het een minimale stromingsenergie nodig, hoewel het niet per definitie betekent dat de beek dan ook meandert.

3.1.1.3 PARAMETERS

De dichtheid van water en de zwaartekracht zijn algemeen bekend en zijn:

$$\rho = 998 \left(\text{kg/m}^3 \right);$$

$$g = 9,81 \left(\text{m/s}^2 \right)$$

Geulvullende afvoer (Q)

De *geulvullende afvoer*, bepalend voor de dimensies van de beek in een evenwichtssituatie, is de afvoer die het meest effectief is in het verplaatsen van sediment. Deze kan op verschillende manieren bepaald worden: de morfologische methode en drie hydrologische benaderingen. De morfologische methode is de afvoer die de beek nog net kan verwerken zonder dat deze overstroomt. Het geldt voor beken waar sprake is van een natuurlijk dynamische evenwicht. Echter bij menselijk ingrijpen (zoals stuwen, vistrappen en beekherstelmaatregelen) is er geen sprake meer van een dergelijk evenwicht, wat maakt dat deze methode vaak niet toepasbaar is. De drie hydrologische benaderingen van de geulvullende afvoer zijn de gemiddeld jaarlijkse afvoer, de afvoer die statistisch gezien een herhaling heeft van 1,58 jaar en de gemiddelde jaarlijkse piekafvoer.

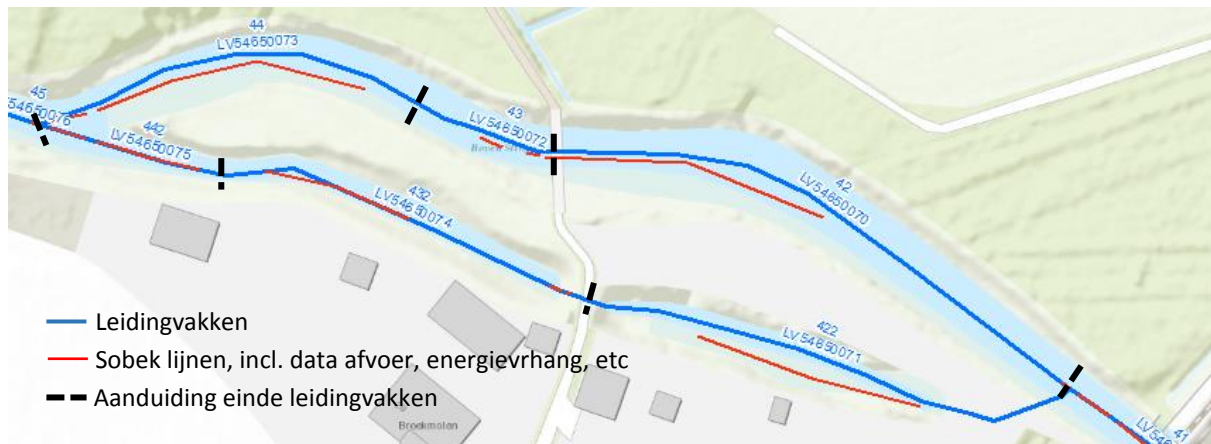
Om een mogelijke vergelijking van resultaten te kunnen maken met het onderzoek naar erosie-sedimentatie in de Bekendelle (Klop, 2017), is gekozen voor een maatgevende afvoer die gemiddeld 1x per jaar (=T1) bij overlaat Berenschot voorbij komt (zie Bijlage 3). Door dit in te voeren in een Sobek-model is vervolgens te berekenen wat de waterafvoer op een willekeurige andere plek van de Boven Slinge is.

Beschrijving Sobek-model

Het Sobek-model is een reeds bestaand model dat in het kader van NBW-toetsing (2012-2015) is opgezet. Het is gebaseerd op een theoretisch leggerprofiel uit 2014. Aan de uitkomsten wordt een kans meegegeven wat

samen 100% maakt. De kans (25%, 50% en 25%) is gebaseerd op achtereenvolgens de ruwheidsklassen ruw, gemiddeld en glad. Ze worden bepaald door het onderhoudspakket en de breedteklasse (klein, normaal en breed).

De waarden voor de parameters afvoer, energieverhang, waterdiepte en gemiddelde snelheid worden door Sobek in een tabel gezet die hoort bij een punten en/of lijnen bestand. Deze zijn in Gis aan de leidingvakken te koppelen. Daar het lijnen-bestand "leidingvakken" de loop van de Boven Slinge het beste weergeeft, zijn uiteindelijk de waarden uit het punten- en lijnenbestand van Sobek hieraan gekoppeld (d.m.v. de tool "Spatial Join", optie closest).



Figuur 6 Visualisatie koppeling Sobek data aan leidingvakken. Zichtbaar is het verschil in lengte van de lijnen

Om inzichtelijk te maken hoe de beek reageert bij verschillende afvoeren is gekozen voor een reeks aan afvoeren: 1%, 5%, 10%, 20%, 50% van T1, T10, T25 en T50 (T=herhalingsstijd van achtereenvolgens 1x/jaar, 10, 25 of 50 jaar)

Dalverhang (S_v)

Als waarde voor het dalverhang (S_v) is gekozen voor het *energie-verhang* (S_e). Dit om een voorspelling te kunnen maken op de korte termijn, waarop mogelijke maatregelen getroffen kunnen worden. Deze is evenals de afvoer berekend met Sobek en hetzelfde model.

Breedte referentiegeul

Ter bepaling van de breedte voor de referentiegeul wordt gekeken naar het beddingmateriaal. Dit is vastgesteld door dinoloket en de bodemkaart te raadplegen, evenals het rapport van Arcadis(zie literatuurlijst)

Mediaan (D_{50})

Ook voor een inschatting van de mediane korreldiameter van het beddingmateriaal (D_{50}) is het dinoloket en de bodemkaart geraadpleegd, evenals het rapport van Arcadis(zie literatuurlijst). De uiteindelijk gekozen mediaan voor de berekeningen is gebaseerd op metingen van sedimentmonsters met de sedimentschijf. Deze monsters zijn genomen in de stroomgeul, achter een bank en op de bank ter plaatse van de Bekendelle en de zandvang bij de Kottenseweg.

3.1.2 SEDIMENTTRANSPORT

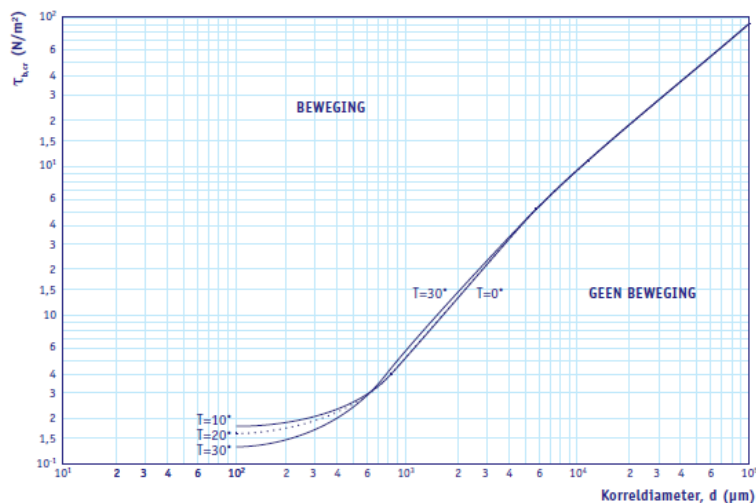
3.1.2.1 BESCHRIJVING

Onder sedimenttransport vallen vele soorten van transport. Zo beweegt het sediment al rollend over de bedding, springend/salterend of in suspensie. Het sediment kan van bovenstrooms van de beek komen of vanaf de oevers door middel van afspoeling, maar ook van oevererosie. Komt het beddingsediment afkomstig van oevererosie in beweging, dan kan verdere oevererosie optreden.

3.1.2.2 DIAGRAM EN VERGELIJKING

Beschrijving van sedimenttransport door schuifspanning geeft een reëel beeld van het fysische proces. Indien door toename van stromingscondities de schuifspanning op een specifieke korrel groter wordt en boven een grenswaarde komt, dan komt deze in beweging. Deze grenswaarde is te bepalen uit het diagram in figuur 7 door bij een korreldiameter de verticale schuifspanning (τ_b) af te lezen.

De optredende schuifspanning is te berekenen volgens onderstaande formule:



Figuur 7 Diagram met een experimenteel bepaalde curve voor het wel/niet in beweging komen van sediment

$\tau_b = \rho g h S_e$, waarbij

τ_b = schuifspanning op de bedding (N/m^2)

ρ = dichtheid van water (kg/m^3);

g = zwaartekrachtsversnelling (m/s^2);

h = waterdiepte (m);

S_e = energiegradiënt (-);

3.1.2.3 PARAMETERS

De dichtheid van water en de zwaartekracht zijn:

$\rho = 998 (kg/m^3)$;

$g = 9,81 (m/s^2)$

Waterdiepte (h)

De waterdiepte is afhankelijk van de afvoer en het energieverhang (S_e) en is berekend met Sobek. Het betreft wederom hetzelfde model, waarmee ook de afvoer is berekend.

Energiegradiënt (S_e)

Dezelfde waarden zijn gebruikt als bij de berekening van geultype (zie dalverhang).

Korreldiameter (d)

Voor een inschatting van de spreiding van korreldiameters van het beddingmateriaal is het dinoloket en de bodemkaart geraadpleegd, evenals het rapport van Arcadis (zie literatuurlijst). De uiteindelijk vastgestelde spreiding van korreldiameters voor de berekeningen is gebaseerd op metingen van sedimentmonsters met de sedimentschijf. Deze monsters zijn genomen in de stroomgeul, achter een bank en op de bank ter plaatse van de Bekendelle en de zandvang bij de Kottenseweg.

3.1.3 TRANSPORTCAPACITEIT EN NETTO EROSIE/ SEDIMENTATIE

Deze paragraaf gaat niet over of het beddingsediment in beweging komt, maar over de mate waarin het transport van sediment in suspensie en over de bedding kan optreden.

3.1.3.1 BESCHRIJVING

De formules die gaan over de hoeveelheid beddingmateriaal dat in beweging komt maken vaak onderscheid in de manier waarop sediment transport plaatsvindt: rollend over de bedding, salterend of springend enerzijds en in suspensie anderzijds. De gekozen formule Egelund & Hansen (Makaske, B.; Maas, G., 2015) maakt dit onderscheid niet. Spoeltransport, hetgeen een vorm van suspensief transport is, wordt echter niet meegenomen in deze formule. Het is suspensief transport van sediment dat door afstroming in de beek terecht is gekomen maar nooit tot afzetting komt in de bedding en daarom ook niet relevant is voor de morfodynamiek in het projectgebied. Daarom en vanwege de relatieve eenvoud van de formule is gekozen voor de formule Egelund & Hansen. Net zo belangrijk is het feit dat de parameters vaak aanwezig zijn.

3.1.3.2 VERGELIJKINGEN

Transportcapaciteit

Voor de transportcapaciteit zijn vele formules, waarvan de empirische formule van Engelund & Hansen (1967) er een van is:

$$q_t = \frac{(\rho_s 0,05 u_{gem}^5)}{((s-1)^2 g^{0,5} D_{50} C^3)}, \text{ waarbij}$$

q_t = sedimenttransport (kg/m/s);

ρ_s = soortelijke dichtheid van sediment (kg/m³);

u_{gem} = gemiddelde snelheid in de geul (m/s);

s = specifieke sedimentdichtheid (ρ_s/ρ);

ρ = dichtheid van water (kg/m³);

g = zwaartekrachtsversnelling (m/s²);

D_{50} = mediaan van de korrelgrootteverdeling van het beddingmateriaal (m);

C = Chezy – waarde (m^{0,5}/s);

Bij het baggeren wordt een hoeveelheid (m³) genoteerd. In dit rapport is er om die reden voor gekozen de hoeveelheid sedimenttransport toe te rekenen naar m³/jaar. Daarom is de uitkomst van bovenstaande formule eerst gedeeld door de dichtheid van het sediment (1600kg/m³). Dit is vermenigvuldigd met de geulbreedte. Deze is uit de legger gehaald. Vervolgens is het transport bij de verschillende afvoerdebieten vermenigvuldigd met verhoudingsgetallen voor de duur waarin een afvoer plaatsvindt. De uitkomsten van alle afvoerdebieten zijn opgeteld, zodat er een transportcapaciteit op jaarbasis ontstaat.

Netto erosie/ sedimentatie

De transportcapaciteit is te vertalen in netto erosie/sedimentatie door de volgende interpretatie te maken: daar, waar de transportcapaciteit van opeenvolgende leidingvakken in stroomrichting afneemt, treedt sedimentatie op ter grootte van het verschil. Dit geldt ook andersom: daar, waar de transportcapaciteit toeneemt, treedt erosie op. Daarmee is meer op detailniveau vast te stellen waar erosie of sedimentatie optreedt

Hierbij wordt onder “netto erosie” het structureel insnijden van de beek verstaan en onder “netto sedimentatie” het structureel aanzanden. Zo kan sedimentatie optreden in de vorm van een bank, maar zal als gevolg daarvan een van de oevers eroderen. Resultaat kan zijn dat erosie en sedimentatie in balans is.

3.1.3.3 PARAMETERS

De dichtheid van water, de zwaartekracht en soortelijke dichtheid van sediment zijn:

$$\rho = 998 \text{ (kg/m}^3\text{)};$$

$$g = 9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

$$\rho_s = 1800 \text{ (kg/m}^3\text{)}; \text{ en daarmee}$$

$$s = (1800/998) = 1,8;$$

Gemiddelde snelheid (u_{gem})

De gemiddelde snelheid is berekend met hetzelfde Sobek-model als waar ook de afvoer, energiegradiënt en waterdiepte mee is berekend (zie “Beschrijving Sobek-model” onder Geultype).

Mediaan (D_{50})

Voor een inschatting van de mediane korreldiameter van het beddingmateriaal (D_{50}) is het dinoloket en de bodemkaart geraadpleegd, evenals het rapport van Arcadis (Klop, 2017). De uiteindelijk gekozen mediaan voor de berekeningen is gebaseerd op metingen van sedimentmonsters met de sedimentschijf. Er zijn op drie locaties monsters genomen: twee locaties in de Bekendelle en één bij de zandvang bij de Kottenseweg. Per locatie zijn er drie monsters genomen: in de stroomgeul, achter een bank en op de bank ter plaatse van de Bekendelle en de zandvang bij de Kottenseweg.



Figuur 8 Bepaling korrelgrootte met behulp van sedimentschijf

Chezy (C)

De Chezy-waarde is te berekenen volgens de formule van Chezy, hetgeen geldt voor turbulente uniforme stationaire stroming. De term turbulent uniform houdt in dat de snelheid die kort fluctueert in snelheid en richting, wordt uitgemiddeld, waarbij het in de lengterichting niet varieert.

$$C = 18 \log(12R/K_s), \text{ waarbij}$$

$$C = \text{Chezy - waarde (m}^{0.5}/\text{s)};$$

$$R = \text{hydraulische straal (A/O ; in m)}; \text{ waarbij}$$

$$A = \text{doorstroomoppervlak (m}^2\text{)};$$

$$O = \text{natte geulomtrek (m)};$$

$$K_s = \text{nikuradse - ruwheid (-)};$$

De nikuradse ruwheid is een maat voor de weerstand die een overstroomd oppervlakte biedt aan de stroming, zoals beddingmateriaal, beddingvormen en vegetatie. Achtereenvolgens wordt dan voor K_s : $3 \cdot D_{90}$, halve ribbelhoogte of algemene waarden voor de mate van begroeiing, genomen.

Om een indicatie te krijgen van hoe de Chezy-waarde varieert bij verschillende waterdiepten, is de formule ingevuld voor een vereenvoudigde bakvormige geulvorm met een breedte van 4 m. Gezien de matige begroeiing en het ontbreken van de sortering van het beddingmateriaal is de halve ribbelhoogte genomen als waarde voor de nikuradse-ruwheid.

Verhoudingsgetallen

De verhoudingsgetallen voor berekening van een jaarrond sedimenttransport (zie uitleg vergelijking), zijn af te leiden van de onderschrijdings (duur)lijn die bekend is van de overlaat bij Berenschotbrug (zie 6.1).

Geulbreedte (b)

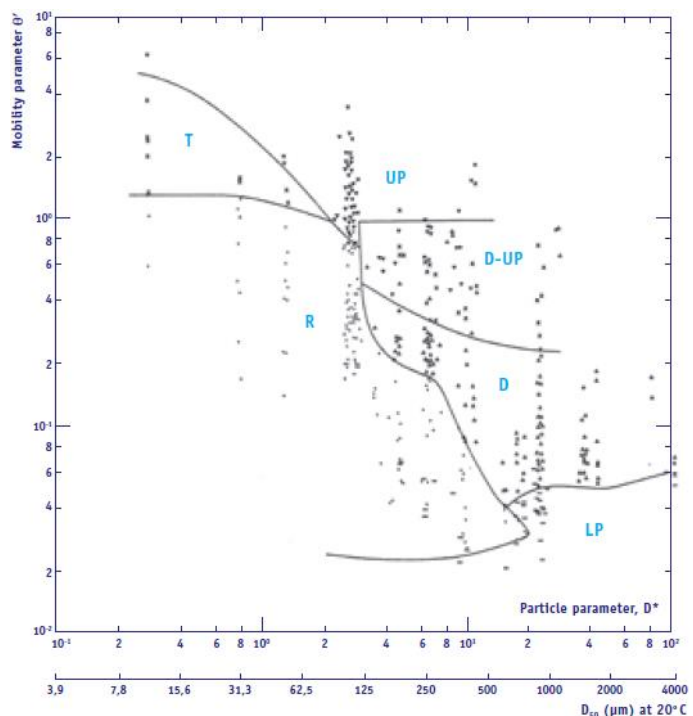
Als geulbreedte is de bodembreedte uit de actuele legger genomen. Op enkele plekken waar deze ontbreekt is de bodembreedte van het aansluitende profiel genomen.

3.1.4 BEDDINGVORM

3.1.4.1 BESCHRIJVING

Gevolgen van sedimenttransport zijn verschillende beddingvormen die in te delen zijn in twee groepen: relatief kleine en grote beddingvormen. Kleine beddingvormen veranderen voortdurend in relatie tot de stromingscondities en bouwen zich niet op tot boven de gemiddelde waterlijn. De grotere daarentegen (banken) doen dat wel en hebben een langere levensduur. Ze ontstaan waar voldoende ruimte in de bedding is, waardoor laterale stromingsvariatie aanwezig is. Banken beïnvloeden daarmee eveneens de algemene stromingscondities.

Beddingmateriaal is grotendeels zand waarbij het afhangt van stromingsvariabelen en van zijn korrelgrootte of en in welke mate het getransporteerd kan worden. Het transport ervan bepaalt op zijn beurt in hoge mate de vorm en het gedrag van de beekbedding. Kan de beek het beddingmateriaal makkelijk transporteren, dan ontstaan er allerlei vormen en banken die de lijn van de (fictieve) stroomdraad (/lijn van hoogste stroomsnelheden) kan doen verleggen, bijvoorbeeld richting een oever. Hierdoor is er



Figuur 9 Stabiliteitsdiagram voor beddingvormen. LP = vlakke bedding onder laag-energetische stroming; R = stroomribbels; D = megaribbels/duinen; T = overgang; UP = vlakke bedding onder hoog-energetische stroming

grotere kans op lokale oevererosie die gepaard gaat met aanzanding op de tegenovergestelde oever door rustiger condities aan die zijde.

3.1.4.2 DIAGRAM EN VERGELIJKING

Ook beddingvormen zijn weer te geven in een stabiliteitsdiagram. Hierin is de Shields-parameter (hier korrelgerelateerde mobiliteitsparameter tegenover de mediane korreldiameter van het beddingmateriaal (D_{50})). De mobiliteits-parameter is dimensieloos en is een waarde voor de krachtenverhouding tussen de hydraulische kracht en de weerstandskracht.

$\theta = \tau_b / [(\rho_s - \rho)gd]$, waarbij

θ = Shields – parameter (–);

τ_b = schuifspanning op de bedding (N/m^2)

ρ_s = soortelijke dichtheid van sediment (kg/m^3);

ρ = dichtheid van water (kg/m^3);

g = zwaartekrachtsversnelling (m/s^2);

d = korreldiameter van het sediment (m);

3.1.4.3 PARAMETERS

De dichtheid van water, de zwaartekracht en soortelijke dichtheid van sediment zijn:

$\rho = 998 (kg/m^3)$;

$g = 9,81(m/s^2)$;

$\rho_s = 1800 (kg/m^3)$

Schuifspanning (τ_b)

Voor de berekening van de schuifspanning wordt verwezen naar de formule voor sedimenttransport.

Korreldiameter (d)

Als korreldiameter is gemakshalve de mediaan genomen zoals berekend bij geultype en sedimenttransport. Daarmee zijn in het diagram grenswaarden van de mobiliteitsparameter te bepalen voor de verschillende overgangen van beddingvormen.

3.2 VERIFICATIE

Het studiegebied is een aantal keer bezocht om waarnemingen te doen of dwarsprofielen te meten. Aangezien er recent onderzoek is gedaan naar de erosie/sedimentatie in de Bekendelle zelf, is de focus bij de waarnemingen en metingen vooral gericht bovenstrooms ervan. Ook omdat de modellen uitwijzen dat grotere hoeveelheid sedimentatie vooral bovenstrooms van de Bekendelle plaatsvindt.

3.2.1 WAARNEMINGEN

Bij de waarnemingen is gelet op:

1. Afkalving van de oever (foto's 1 en 2)
2. Ondergraving van oever
3. Oeverafzetting (foto's 2 en 9)
4. Oeverbegroeiing (foto 2)
5. Beddingpatroon (foto 7)
6. Ontwikkeling/positie banken (foto's 4, 5, 6 en 11).

De waarnemingen zijn vastgelegd op foto en ingetekend op een kaart (zie bijlage 11). Ze zijn per model in een tabel gezet met de resultaten van dat model zodat ze makkelijker vergeleken kunnen worden. Deze staan onder de paragraaf “verificatie” onder de afzonderlijke hoofdstukken van de modellen. Hieronder zijn de trajecten, die zijn bezocht, beschreven aan de hand van foto's om een zo volledig mogelijk beeld te krijgen. Voor plaatsbepalingen in de tekst, zie Bijlage 1. De trajecten zijn stroomafwaarts beschreven, dit betekent dat deze kaart van rechts naar links gelezen moet worden.

Op dinsdag 29 maart 2018 is het bovenstroomse gedeelte vanaf de rijksgrens tot halverwege Kottenseweg bezocht. Op dat moment had het net geregend. Hierdoor was er sprake van een relatief hoge waterstand (39,5 m+NAP) en een kwart van de maatgevende afvoer ($1,35 m^3/s$).

Dit gedeelte (leidingvak 3-7) varieert van rechte stukken afgewisseld met bochten en stromingswisselingen van rustig tot snel, mede als gevolg van plotselinge versmallingen in de beek. Het eerste deel vanaf de Vosseveldseweg is recht met een redelijk verhang en oevers, grenzend aan weilanden, die ondergraven zijn (zie foto 1). Dit wordt opgevolgd door een reeks aan bochten, waarbij, geheel kenmerkend, erosie in de buitenbocht en sedimentatie in de binnenbocht optreedt. De sedimentatie bestaat uit zowel afzettingen voor de oevers (laterale banken) als op de oevers en zijn al iets begroeid. De beek is op enkele plekken diep ingesneden, waar dan ook steile afkalvende oevers zijn ontstaan (zie foto 2). Op enkele plekken zijn de oevers vastgelegd met stenen, voornamelijk in buitenbochten voor bruggen of net voor weilanden.



Foto 1 Afkalvende oevers grenzend aan weiland



Foto 2 Steile afkalvende oevers met reeds begroeide oeverafzettingen in de binnenbocht



Foto 3 Laterale bank, opgegaan in de oever

Voorbij de Kottenseweg tot de zij-instroom van de Osink-Bemersbeek is sprake van veel sedimentatie. Het is vergelijkbaar met het eerste deel vanaf Vosseveldseweg, echter is het hier breder. Ook hier is sprake van sedimentatie in de binnenbocht en afkalvende steile buitenbochten. Daarnaast zijn er op zo'n kort stuk relatief veel banken, zowel gelegen voor de oevers als in de geul (zie foto's 4).



Foto 4 Laterale bank, zowel in geul als voor de oever

Na een houten boogbrug (@) lijkt de stroming constanter en rustiger (leidingvak 5). Sedimentatie overheerst en uit zich in veel oeverafzettingen en laterale banken die reeds begroeid zijn en opgaan in de oever (zie foto 3). Voorbij een tweede brug lijkt er ook sprake te zijn van afzettingen in de bedding. Echter door het troebele water, dat duidt op sedimenttransport, is de bedding niet goed te zien. Voordat de beek tussen de weilanden verdwijnt richting de Bekeringsweg en Kottenseweg wordt de beek smaller en zijn de oevers sterker begroeid. Dit is ook (nog) net voor de Kottenseweg.



Foto -5 Laterale bank in de zandvang (@) met afkalvende buitenbocht en aanzanding van de binnenbocht



Foto 6 Vlak voor de Stemerdingbrug een bank naast de oever

Op de foto hierboven is de heringerichte slinger met de zandvang op de voorgrond. De Boven Slinge is rechts net onder de Kottenseweg doorgekomen en heeft een relatief hoge stroomsnelheid dat naar de voorgrond toe afneemt. Linksachter, aan het einde van de slinger, wordt het iets dieper en neemt de snelheid weer toe.

Volgens het model beddingvormen, zou bij 10% maatgevende afvoer een bedding moeten zijn die vlak is als gevolg van hoge energetische stroming (zie bijlage 10). Echter in de bedding zijn veelal stroomribbels aanwezig. De oevers in de buitenbocht zijn afgekald en de binnenbocht aangezand. Vlak voor de brug ligt er naast de linkeroever een zandbank (zie foto 6).

Op vrijdag 6 april is bij een lage afvoer $0,54 \text{ m}^3/\text{s}$ (ca. 10% maatgevende afvoer) het traject vanaf de Stemerdingseweg tot de Kottenseweg bezocht. Hier overheerst de sedimentatie. Het begint nog eerst met een recht stuk afkalvende oevers (weiland), echter hier vormen zich ook weer voor beide oevers laterale banken. Volgens de kaart voor beddingvormen zou bij 10% maatgevende afvoer een bedding moeten zijn die vlak is als gevolg van hoge energetische stroming. Op de bedding verplaatst zich een sedimenttong met veelal stroomribbels. Na de eerste bocht is een recht stuk waar enkele bomen in het water gevallen zijn en zich enkele grote banken, zowel in de geul als net voor de beide oevers zijn ontstaan. Het laatste rechte stuk voor de Kottenseweg kenmerkt zich door een paar kleine banken.



Foto 7 Zandtong van ca. 30 cm met stroomribbels



Foto 8 Veel sedimentatie in bedding en bovenin nog een bank voor de oever

Benedenstrooms vanaf de Kottenseweg tot aan het einde van het Buskersbos (Oude Bochtsebaan) is op vrijdag 20 april bezocht. Ook nu was het afvoerdebiet en waterstand laag met respectievelijk 7% van de maatgevende afvoer ($0,38 \text{ m}^3/\text{s}$). Het is een traject met erg veel variatie in stroomsnelheid, erosie-sedimentatie, oevers en beddingvormen.



Foto 9 Verses oeverafzetting begin van Buskersbos

Het begin tot het eerste lange rechte stuk kenmerkt zich vooral door erg veel verse oeverafzettingen. Op ondiepere stukken zijn stroomribbels te zien. Ook bleek bij het doorwaden van de beek dat er grote verschillen (van naar schatting halve meter) in diepten zijn op korte afstand, zowel in de lengte als breedte.



Foto 10 U-bocht in Buskersbos met oeverafzettingen in de buitenbocht en aanzanding in de binnenbocht



Foto 11 Lange laterale bank in de stroomgeul

Dan volgt er een stuk, tot aan de volgende scherpe bocht, waar de stroomsnelheid een stuk lager ligt en de oevers begroeit en iets ondergraven zijn. Op ondiepere stukken zijn weer stroomribbels te zien en net voor de scherpe bocht ligt er voor de linkeroever nog een bank. Daarna volgt een stuk wat op den duur kan leiden tot een bochtafsnijding (zie foto 10). Op de binnenbocht is veel oeverafzetting. De lage scherpe buitenbocht laat naast ondergraving ook oeverafzetting zien.

Daarna, tot het eind van de Buskersbos, is de Boven Slinge een rustig stromende beek, met een licht ondergraven en begroeide linkeroever en wat oeverafzetting op de rechtoever. In de bedding ligt nog een lange laterale bank (foto 11). **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**

Intermezzo

Een fenomeen waar vooraf geen rekening mee is gehouden, is een zandtong die, mede door een lage waterstand en de zon, goed zichtbaar was (zie foto 7). Hier zijn sedimentmonsters genomen van achtereenvolgens de bedding op de zandtong, erachter en ernaast. Vervolgens is een schudproef gedaan om een idee te krijgen van de bezinksnelheid en gekeken naar de korrelverdeling om een globaal beeld van de onderlinge verschillen te krijgen. Deze resultaten zijn in de Bijlage 12 Zandtong bij Stermerdinksweg opgenomen.

3.2.2 METINGEN

Om een indicatie te geven van de mate van structurele aanzanding of insnijding van de beek, zijn dwarsprofielen gemeten. Dit is gedaan door middel van een meetboot. Hierbij zit op een boot (een soort kleine catamaran) een module en een (HDCP) sensor gemonteerd. De boot is een aantal keer per locatie met max. 0,5 m/s dwars over de beek getrokken van de ene oever naar de andere. De module bestaat o.a. uit een GPS bol, waarbij de module de gemeten data door de sensor, koppelt aan de GPS-coördinaten.

Per gemeten punt op een dwarsprofiel is de bodemhoogte bepaald door de gemeten waterdiepte van de waterlevel (m+NAP) af te trekken. Dit is binnen Excel in een grafiek, samen met het oude profiel, uitgezet tegen de afgelegde weg, waarbij dus een dwarsprofiel wordt gegenereerd. Kanttekening (en) hierbij zijn:

- De afgelegde weg is een benadering van de breedte van de beek, omdat het niet altijd lukt de boot in een rechte lijn over de beek te trekken. Hoe beter het lukt hoe meer het de werkelijke breedte benadert.
- Het oude en nieuwe profiel zijn in laterale richting visueel op elkaar gepositioneerd.
- De GPS verbinding is niet altijd optimaal, waardoor metingen van minder waarde worden en/of onbetrouwbaarder zijn. Oplossingen hiervoor zijn ze buiten beschouwing te laten of te schatten door beschikbare gegevens (Sobek/hoogten kunstwerken)

3.3 VALIDATIE

Door de modelresultaten te vergelijken met de waarnemingen en metingen kan een uitspraak gedaan worden over de validiteit (de betrouwbaarheid en daarmee de bruikbaarheid) van het gekozen model ten behoeve van het in kaart brengen van de morfodynamiek. In de volgende hoofdstukken zal dit per model nader worden uitgewerkt. Dit heeft betrekking op de bepaling en verwerking van de parameters en de keuze van de modellen. Ook wordt besproken in hoeverre validatie op basis van de uitgevoerde (veld)waarnemingen mogelijk is.

4 MODEL GEULTYPE

Het hoofdstuk begint met het noemen van de waarden en bandbreedtes van de uitgangspunten voor het model. Hiermee worden de parameters bedoeld, zoals beschreven per model in het vorige hoofdstuk. Daarna volgen de resultaten van het model. In de paragraaf verificatie worden deze resultaten vergeleken met de waarnemingen en metingen die zijn gedaan. Vervolgens wordt in de paragraaf validatie een uitspraak gedaan over de bruikbaarheid van het model. Dat wil zeggen of men hiermee een betrouwbaar inzicht kan krijgen in de morfodynamiek ten behoeve van beheer. Het heeft betrekking op de bepaling en verwerking van de parameters en de keuze van de modellen. Ook wordt besproken in hoeverre validatie op basis van de uitgevoerde veldwaarnemingen en metingen mogelijk is. De hierna volgende hoofdstukken (5-7) over de modellen hebben dezelfde opbouw, zoals hierboven beschreven.

4.1 UITGANGSPUNTEN EN RESULTATEN

4.1.1 UITGANGSPUNTEN

Geulvullende afvoer (Q)

De geulvormende afvoer is gebaseerd op een maatgevende afvoer van $8,5 \text{ m}^3/\text{s}$ dat gemiddeld 1x per jaar ($=T1$) bij overlaat Berenschot voorbij komt (zie figuur onderschrijdingskans bijlage 3). Dit is op de verticale as van onderschrijdingskans in bijlage 3 af te lezen bij 364 dagen ($365-1$). Op 1 dag na is de afvoer lager dan $8,5 \text{ m}^3/\text{s}$! Voor elke willekeurige andere plek van de Boven Slinge is vervolgens door een Sobek model (zie **Fout!** **Verwijzingsbron niet gevonden.** "Beschrijving Sobek-model") de waarden van de afvoer berekend voor 1%, 5%, 10%, 20%, 50% van $T1$, $T10$, $T25$ en $T50$ (T =herhalingsstijd van achtereenvolgens 1x/jaar, 10, 25 of 50 jaar). Zo is de maatgevende afvoer bij de rijksgrens $5,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Energieverhang (S_e)

Indicatie voor het energieverhang varieert bij een maatgevende afvoer tussen 0,03 en 1,94 m/km met een mediaan van 0,705 m/km (zie bijlage 4).

Breedte referentiegeul

Binnen het onderzoek van Arcadis (Klop, 2017) zijn een tweetal bodemmonsters genomen en werd alleen gesproken over zand. Dinoloket wijst uit dat de Boven Slinge in het Laagpakket van Sinkgraven ligt (zie bijlage 4). Deze duidt op: zand, zeer fijn tot zeer grof, soms siltig of grindhoudend. Op de bodemkaart is te zien dat de Boven Slinge overwegend stroomt door zandige gronden als de beekerdgronden (pZg), gooreerdgronden (pZn) en gronden van rivierklei. Uiteindelijk is uitgegaan van zand en daarmee is de breedte referentiegeul berekend in Excel volgens de formule:

$$W_r = 4,7 * \sqrt{Q}, \text{ voor zandig beddingmateriaal } (D_{50} < 2\text{mm}) \text{ of,}$$

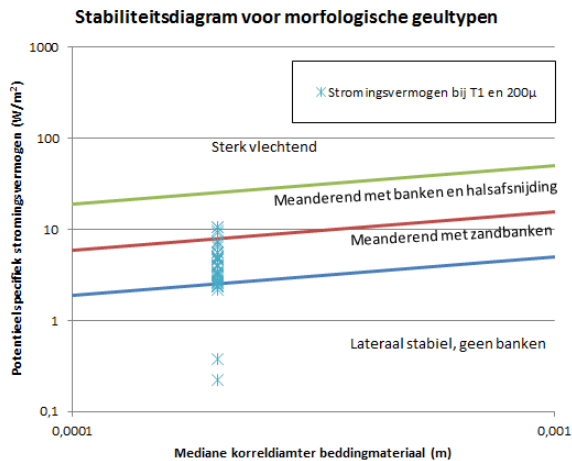
Mediaan (D_{50})

De spreiding van de korrelgrootte van het sediment (zand) is gemeten (zie 3.1.3.3) op 125-355 μm met 200 μm als mediaan.

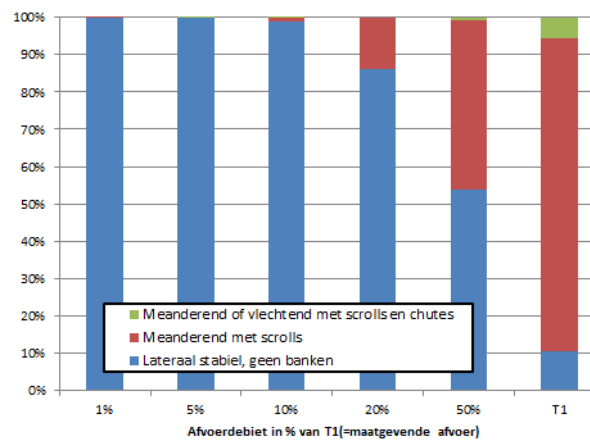
4.1.2 RESULTATEN

Om vast te stellen wat de potentie van een beek is om te meanderen, is de stromingsenergie in een diagram uitgezet tegenover de korrelgrootte (zie ook paragraaf 3.1. "Geultype").

In figuur 12 is te zien dat bij maatgevende afvoer (afvoer dat 1x per jaar voorkomt) 83% van de beek wil meanderen met scrolls (=banken). Bij afname van het afvoerdebiet, neemt het percentage dat wil meanderen exponentieel af. Bij 50% van de maatgevende afvoer is 54% lateraal stabiel.



Figuur 10 De meander-potentie per leidingvak bij maatgevende afvoer en 200µm.



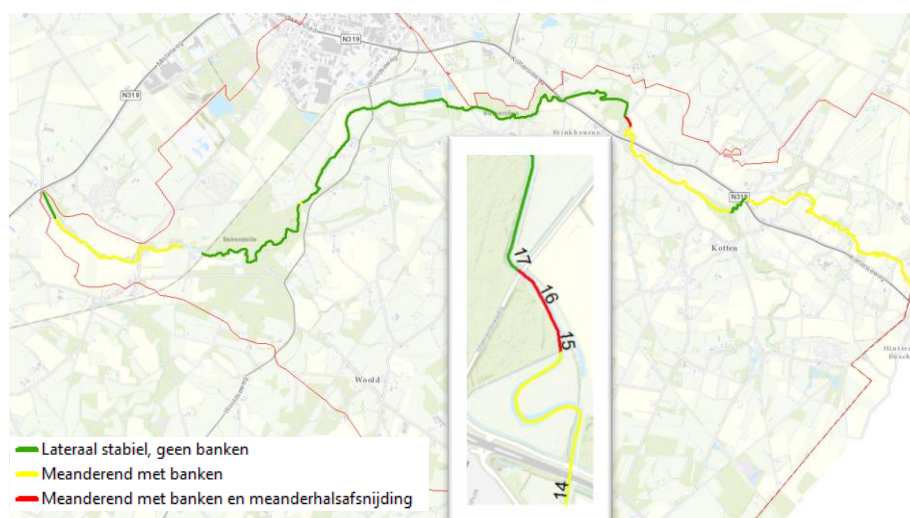
Figuur 11 Meander-potentie van de Boven Slinge, gerekend naar %lengte van totaal (13km)

Er staan drie punten onder in de grafiek die een laag stromingsvermogen hebben bij maatgevende afvoer. Deze zijn van de leidingvakken 17, 26 en 49. Van deze leidingvakken is het verhang het kleinst in verhouding met de andere resultaten, namelijk tussen 0,03 en 0,07 m/km.

Er zijn vier leidingvakken die bij een maatgevende bui (T1) de potentie hebben om te meanderen met banken en halsafsnijding, als gevolg van een hoger stromingsvermogen. Dit zijn de leidingvakken net voor Stermerdinksweg (leidingvakken 15 en 16; zie figuur 14), bovenstrooms van de vispassage bij Vreehorstweg (leidingvakken 46) en voor de zandvang bij Miste (leidingvakken 48; zie figuur 14). Het energieverhang is het grootst voor deze leidingvakken, tussen de 1,5 en 1,9 m/km. De afvoer neemt in zijn algemeenheid verhoudingsgewijs maar minimaal toe: namelijk, van 5,5 naar 8,5 m³/s over 13 km.

Bij 50% van de maatgevende afvoer valt op onderstaande kaart een driedeling op te:

1. Rijksgrens tot begin van Stermerdinksweg
2. Stermerdinksweg tot vispassage Broekmolen
3. Vispassage Broekmolen tot overlaat Berenschot



Figuur 12 Geultype bij 50% maatgevende afvoer. Driedeling van de Boven Slinge met overgangen in meanderpotentie bij Stermerdinksweg en vispassage Broekmolen. Sterke meandering met banken en meanderhalsafsnijding voor Stermerdinksweg.



Figuur 13 Geultype bij maatgevende afvoer. Alleen rondom stuwen (voormalige-) en voor overlaat Berenschot leidingvakken lateraal stabiel.

4.2 VERIFICATIE

4.2.1 WAARNEMINGEN

4.2.1.1 VERBAND WAARNEMINGEN MET MODEL

De beschrijving van het model (zie paragraaf 3.1.1.1) geeft al aan dat er bij een meanderend of vlechtend geultype erosie van buitenoevers te verwachten is en aanzanding in de binnenbocht als gevolg van het ontstaan van banken. Oeverbegroeiing legt de oevers vast en kan duiden op een geultype met lagere stromingsenergie (=recht). Het beddingpatroon is van tijdelijke aard en heeft zodoende geen verband met het geultype.

4.2.1.2 VERGELIJKING MODEL EN WAARNEMINGEN

In onderstaande tabel zijn de uitkomsten van het model geultype (de groene kolom) per leidingvak (of clustering daarvan), uitgezet naast de waarnemingen (blauw/witte kolom) weergegeven in percentages of aantal waarnemingspunten. Dit laatste is gedaan aan de hand van bijlage 11. Hierin wordt zichtbaar dat de uitkomsten van het model niet altijd overeenstemmen met de gedane waarnemingen. De modellen geultypen en netto erosie/sedimentatie zijn geclusterd naar dezelfde opeenvolgende uitkomsten. In onderstaande tabel worden de gegevens voor het geultype eruit gelicht, maar zijn voor de volledigheid tevens de gegevens voor netto erosie/sedimentatie opgenomen. In hoofdstuk 6.2.1 wordt hier nader op ingegaan. Vervolgens zijn de bijbehorende waarnemingen opgenomen in de laatste kolommen van de tabel. Dit aan de hand van bijlage 11 Waarnemingen.

Tabel 1 Verificatie van de modellen "Geultype" (bij 50% maatgevende afvoer) . De groene kolommen zijn de modelresultaten, gevolgd door de resultaten van de waarnemingen

Leiding-vakken	Afstand t.o.v. rijksgrens (m)	Geultype 50% maatgevend	Netto erosie/ - sedimentatie	% Afkalving/ ondergraving oevers	% Oeverafzetting	Aantal banken
1 - 2	0 - 308	Meanderend met banken	netto-erosie	niet waargenomen		
3	308 - 426	Meanderend met banken	netto-erosie	90	10	2
4	426 - 709	Meanderend met banken	netto-sedimentatie	20	40	1
5	709 - 1108	Meanderend met banken	netto-erosie	10	40	1
6 - 7	1108 - 1876	Meanderend met banken	netto-sedimentatie	30	5	0
8	1876 - 2570	Meanderend met banken	netto-erosie	niet waargenomen		
9 - 10	2570 - 2858	Lateraal stabiel, geen banken	netto-sedimentatie	30	60	3
11	2858 - 3500	Meanderend met banken	netto-erosie	niet waargenomen		
12	3500 - 3750	Meanderend met banken	netto-sedimentatie	niet waargenomen		
13 - 14	3750 - 4481	Meanderend met banken	netto-erosie	niet waargenomen		
15	4481 - 4508	Meanderend met banken en meanderhalsafsnijding	netto-erosie	100	100	1
16	4508 - 4599	Meanderend met banken en meanderhalsafsnijding	netto-sedimentatie	0	0	2
17	4599 - 4634	Lateraal stabiel, geen banken	netto-erosie	0	0	0
18 - 20	4634 - 6397	Lateraal stabiel, geen banken	netto-sedimentatie	10	30	12
21 - 22	6397 - 7057	Lateraal stabiel, geen banken	netto-sedimentatie	5	10	1

Nota bene: Het leidingvak 15 is niet representatief voor de natuurlijk morfodynamische processen. Het betreft namelijk het heringerichte stuk in het kader van het project "Burloseweg" dat in 2016 is opgeleverd en waarvan de oevers nog niet geheel begroeid zijn. Vandaar het hoge percentage afkalvende-/ondergraven oevers en oeverafzettingen.

4.2.2 METINGEN

De met meandering gepaard gaande oeverafkalving/ -ondergraving zou terug te zien moeten zijn in de gemeten dwarsprofielen. Ten opzichte van een referentie profiel zijn de oevers in dat geval lateraal verplaatst. Binnen dit onderzoek zijn de metingen en daarmee de verificatie van het model geultype niet goed mogelijk geweest door een tweetal aspecten, namelijk:

1. De waterstanden waren te laag om de oevers in beeld te kunnen krijgen. Immers meet de meetboot alleen punten die onder water liggen.
2. Een betrouwbare laterale uitlijning van het gemeten profiel en referentie profiel was op korte termijn niet mogelijk. Door de conversie van de kadastrale ondergrond naar het nieuwe GBKN (Grootschalige basiskaart Nederland) is de exacte ligging van het referentie profiel niet betrouwbaar.

4.3 VALIDATIE

Inzicht model

Het model maakt inzichtelijk dat de Boven Slinge in drie trajecten is op te delen op basis van geultype, met overgangen in meanderpotentie bij Stemerdingweg en vispassage Broekmolen. De leidingvakken die lateraal stabiel zijn, hebben een relatieve lage energieverhang en zijn ter plaatse van de stuwen en de zandvang bij Miste.

Volgens het model is te verwachten dat geultypen met meanderpotentie een hoger percentage oevers hebben die afgekald of ondergraven zijn en een groter aantal banken hebben ten opzichte van geultypen die lateraal stabiel zijn.

Betrouwbaarheid model

Enkele delen van de Boven Slinge bevestigen het beeld dat het model geultype schetst, echter enkele delen spreken dit beeld tegen. Tabel 1 laat zien dat leidingvakken 3 en 15 dit beeld bevestigen met respectievelijk

90% oeverafkalving/ondergraving met 2 banken en 100% oeverafkalving/ -ondergraving met 1 bank. Daarentegen laat cluster 9-10, volgens het model geultype “lateraal stabiel, geen banken”, bij de waarnemingen 30% oeverafkalving/ondergraving met 3 banken zien, hetgeen zou duiden op enige meanderpotentie. Ook de 12 banken in cluster 18-20 duiden op gelijke wijze op een geultype met meanderpotentie in plaats van wat het model voorspelt, namelijk geultype lateraal stabiel zonder banken. Een mogelijke verklaring voor de aanwezigheid van de banken in deze clusters 9-10 en 18-20 is dat de overgang van netto erosie naar netto sedimentatie in combinatie met verstoringen in de geul, leidt tot vorming van banken als gevolg van lokaal sterke afname van de transportcapaciteit. Ter plaatse van “Bovenstrooms Buskersbos (leidingvak 19)” (zie figuur 25) ontbreken verstoringen in de geul, waardoor hier over de volle breedte van de geul, volgens het model, netto sedimentatie optreedt in plaats van banken.

Er is niet geprobeerd het model van geultype met metingen van dwarsprofielen te valideren. Met het model wordt namelijk een geulpatroon beschreven. Een dwarsprofiel beschrijft een punt op dit patroon. Met meerdere opeenvolgende metingen op een patroon zou het model voor geultype eventueel wel gevalideerd kunnen worden. Dit is in dit onderzoek echter niet gedaan.

Validatie van het model geultype is op basis van het verrichte onderzoek onvoldoende mogelijk. Dit kan betekenen dat het model niet betrouwbaar is, dat de methode van verificatie ontoereikend is of dat er bijvoorbeeld toch een verkeerde keuze in parameters is gemaakt of er factoren spelen waarmee in het model onvoldoende rekening is gehouden.

Kanttekeningen bij keuze voor het Sobek model

De uitgangspunten afvoer en energieverhang worden voor de hele Boven Slinge berekend door Sobek dat gebaseerd is op de theoretische legger uit 2014. Hetzelfde geldt voor waterdiepte en gemiddelde stroomsnelheid als uitgangspunten voor de andere modellen. De legger uit 2014 verschilt ten opzichte van de huidige legger uit 2017 vooral in de wijzigingen die gedaan zijn in het kader van project “Burloseweg”. De drie stuwen die hier verwijderd zijn, zijn handmatig aangepast in het model. De vier ingebrachte bochten (zie bijlage 4) verlagen in werkelijkheid het geul verhang (lees energieverhang) en daarmee de stromingsenergie. Doordat begin en eind van deze bochten zijn aangesloten op de oude bodemhoogte is het gebruik van de legger uit 2014 acceptabel.

Ook duidt de naam *theoretische* legger op het feit dat er verschillen kunnen en zullen zijn tussen het theoretische profiel en de praktijk. In dat geval zal er verandering zijn in de morfodynamiek. Verbreding van de geul, niet opgenomen in de legger, leidt bijvoorbeeld tot aanzanding of vorming van banken.

Verstoringen als ingevallen bomen of inhangende takken, leveren een wezenlijke bijdrage aan de vorming van banken en daarmee aan de verandering van de morfodynamiek ter plaatse. Daarom kan de vraag gesteld worden of deze in de ruwheid van het Sobek model moet worden meegenomen. Vooral als men de boom laat liggen. Wordt dit niet in het model meegenomen, dan kan ervoor worden gekozen bij de verificatie de waarneming van bomen in combinatie met vorming van banken te registreren. Daarmee kan onderscheid gemaakt worden in de oorzaak van het ontstaan van banken, namelijk als gevolg van meanderpotentie of verstoring van buiten.

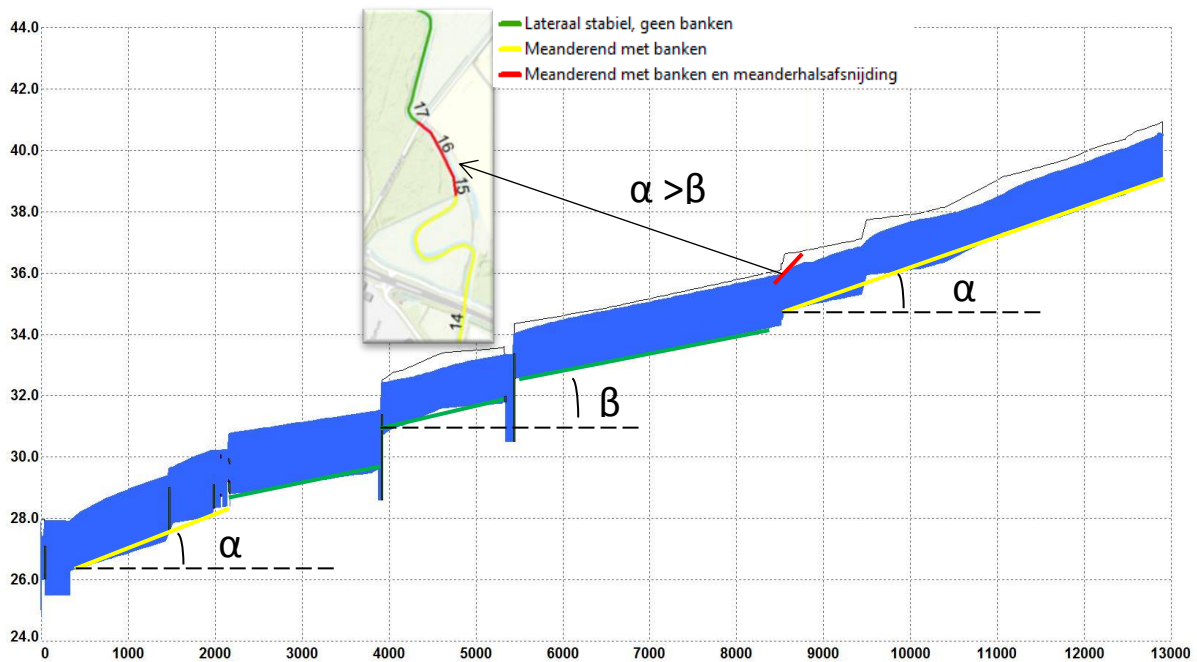
Verwerking van Sobek data

Bij het koppelen van het punten en/of lijnenbestand aan de leidingvakken in GIS moeten keuzes gemaakt worden in gebruik van de methode (tool “Spatial Join”, optie closest) en opties (o.a. minimum/maximum/average). Dit gaat ten koste van betrouwbaarheid van het uiteindelijke resultaat van de modellen, mede door het verschil in lengte tussen de lijnen (zie figuur 6).

Onnauwkeurigheid bepaling korrelgrootte

Door de flauwe hellingen van de lijnen in het stabiliteitsdiagram voor geultypen, zal een verandering van de korrelgrootteverdeling geen relatief groot effect hebben op het resultaat van het model geultype.

Interpretatie van de pieken in de energieverhanglijnen



Figuur 14 Relatie energieverhang en het model geultype, evenals oorzaak piek in het energieverhang. Hierbij geeft de helling van het bovenkant blauwe vlak geeft het energieverhang aan.

Op bovenstaande kaart blijkt het verband tussen het geultype en het energieverhang uit het Sobek-model. Te zien is de overeenkomst van de trajecten met meanderpotentie en een grotere energieverhang (zie lijnkleuren). Ook valt op dat een relatief korte piek in het energieverhang (steile rode lijn) gekoppeld is aan een naar verhouding grote leidingvak met geultype “Meanderend met banken en meanderhalsafsnijding”. Gebaseerd op deze lengte-verhouding geven deze leidingvakken een vertekend beeld, doordat de korte piek in het energie verhang geen grote veranderingen in de morfodynamiek teweeg zal brengen.

Verificatiemethode

Waarnemingen (en de vergelijkingen ervan) zijn zeer nuttig om een algemeen beeld te krijgen van de morfodynamiek. Ze dienen op een doordachte manier gekwalificeerd te worden, om vervolgens gebruikt te worden om modellen te valideren. De gekozen waarnemingspunten dienen gekoppeld te worden aan de kenmerkende eigenschappen van de modellen. Deze punten zijn echter niet altijd waarneembaar, zoals het beddingpatroon. Maar ook ondergraven oevers zijn niet altijd te zien als de waterstand hoog is.

5 MODEL SEDIMENTTRANSPORT

5.1 UITGANGSPUNTEN EN RESULTATEN

5.1.1 UITGANGSPUNTEN

Waterdiepte (h)

De waterdiepte, berekend met Sobek, varieert bij een afvoer van T1 tussen 1,20 en 2,88 m met een mediaan van 1,53 m (zie bijlage 5).

Energiegradiënt (S_e)

De indicatie voor het energieverhang varieert bij een maatgevende afvoer tussen 0,03 en 1,94 m/km met een mediaan van 0,705 m/km (zie bijlage 5).

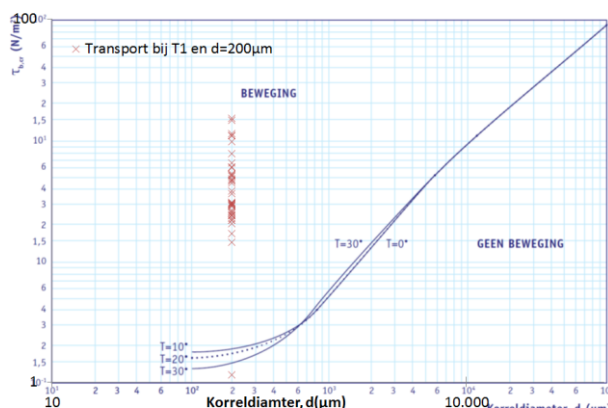
Mediaan (D_{50}) als korreldiameter

De spreiding van de korrelgrootte van het sediment (zand) is gemeten op 125-355 μm met 200 μm als mediaan. Zie hoofdstuk 4.1.1 voor de uitleg voor deze keuze.

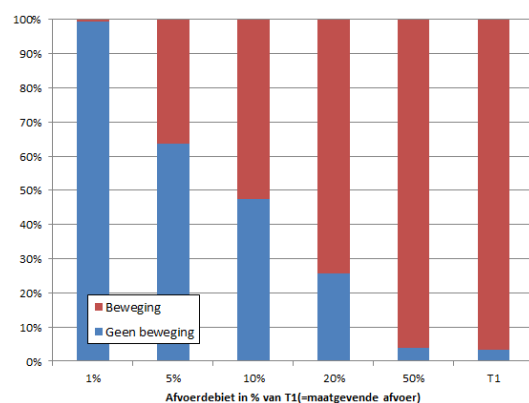
Uitgaande van de mediaan(D_{50}) en een watertemperatuur van 10°C is de grenswaarde voor de schuifspanning vast te stellen op ca. 1,8 N/m² (zie figuur 16).

5.1.2 RESULTATEN

Bij een korreldiameter gelijk aan de mediaan (200 μm) als uitgangspunt genomen, blijkt dat nagenoeg van alle leidingvakken het sediment in beweging komt bij een maatgevende afvoer.

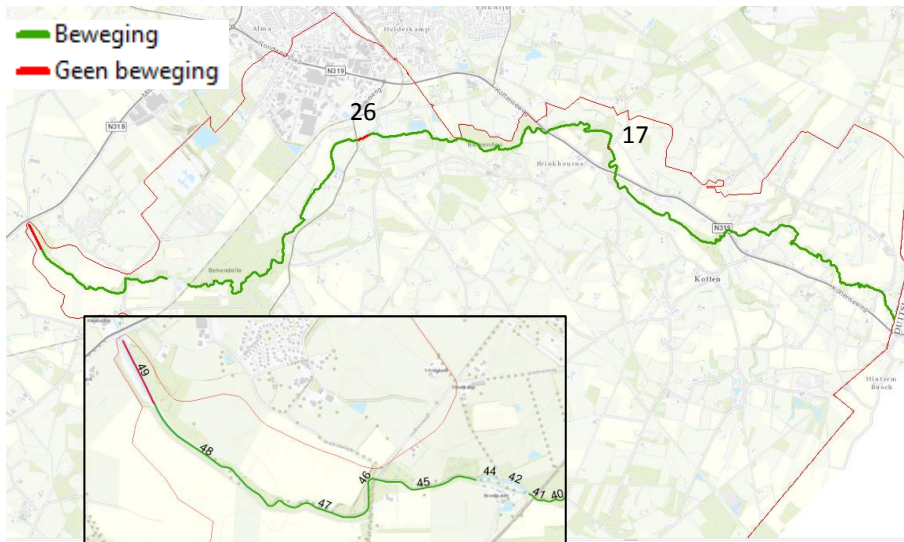


Figuur 15 Sedimenttransport bij 20%, 50% en 100% T



Figuur 16 Verloop van sedimentbeweging bij afvoertoename, gerekend naar %lengte van totaal

Gekeken naar de sedimentbeweging bij toenemende afvoer (figuur 17), blijkt dat bij 5% maatgevende afvoer 37% van het beddingsediment van de Boven Slinge in beweging is. Dit gebeurt bij ca. 0,28 m/s. Daarna neemt het lineair toe tot 50% maatgevende afvoer, waarbij 98% van het beddingsediment in beweging is. De uitzonderingen, waar geen beweging optreedt, zijn de leidingvakken 17, 26 en 49 (respectievelijk benedenstrooms Stermerdinksweg, benedenstrooms watermolen Den Helder en overlaat zandvang bij Miste). Hier komt het beddingmateriaal niet in beweging bij maatgevende afvoer door het lage energie verhang.



Figuur 17 Voornamelijk sedimenttransport bij maatgevende afvoer, met uitzondering van leidingvakken 17, 26 en 49 (zie nr's), achtereenvolgens Stemerdinksweg, Watermolen Den Helder en zandvang Miste

De kaarten (zie bijlage 5) van het sedimenttransport bij afvoeren van 1% maatgevende afvoer tot maatgevende afvoer, laten het ruimtelijk verloop zien hoe het sediment in beweging komt. Waar bij het geultype een driedeling ontstaat bij 50% maatgevende afvoer, ontstaat deze bij het model sedimenttransport al bij 10 % maatgevende afvoer een driedeling op, namelijk:

1. Rijksgrens tot begin van Buskersbos
2. Beging Buskersbos tot bovenstrooms van vispassage Vreehorstweg
3. Vispassage Vreehorstweg tot overlaat Berenschot

Dat er geen beweging van sediment is bij overlaat Berenschot, is begrijpelijk vanwege de aanwezigheid en functie van de zandvang. De zandvang moet het sediment laten sedimenteren dat afkomstig is van bovenstrooms van de zandvang.

5.2 VERIFICATIE

Tijdens de veldbezoeken was het zicht op de bedding soms beperkt door een hoge waterstand of troebel water. Dit duidt op suspensief sedimenttransport en niet zozeer beddingtransport waar het in dit hoofdstuk over gaat. Waar de bodem wel zichtbaar was, betrof het vaak zeer lokale beddingtransport. Waar de stroming hoger is of de beek ondieper is treedt beddingtransport op en waar de stroming laag is geen beddingtransport zichtbaar.

Het meten van dwarsprofielen is een statische meting, waarmee een dynamisch proces als sedimenttransport niet te meten is. Wellicht is een kwantitatieve beschrijving van het beddingtransport te geven door met een zogenaamde "integrated sampler" op een vaste afstand van de bedding te meten. Een integrated sampler is een soort fles dat sediment filtert uit het in- en uitstromende water.

5.3 VALIDATIE

Inzicht model

Het model maakt inzichtelijk dat er op basis van sedimenttransport een driedeling is te maken bij 10% van de maatgevende afvoer met overgangen bij het begin van Buskersbos en vispassage Vreehorstweg.

Betrouwbaarheid model en verificatiemethode

Door het ontbreken van goede en voldoende verificatiemogelijkheden is niet vast te stellen of het model betrouwbaar is.

Bepaling/ verwerking van de parameters

Evenals voor de overige modellen geldt hier voor de parameters energieverhang en waterdiepte de kanttekeningen, zoals genoemd onder “Kanttekeningen basis voor het Sobek model” in paragraaf 4.3. Hierbij gaat het over het gebruik van een gedateerde legger, verschil tussen het legger- en werkelijke profiel en modellering van verstoringen.

De spreiding van de korrelgrootte 125-355µm valt binnen het bereik waarin de experimenteel bepaalde curve in figuur 16 geen grootte toename in de bandbreedte voor de schuifspanning oplevert. Een keuze voor een andere korrelgrootte als parameter levert hier met andere woorden geen andere resultaten in het model op en is daarmee niet van invloed op de betrouwbaarheid van het model.

6 MODEL TRANSPORTCAPACITEIT, NETTO EROSIE/ -SEDIMENTATIE

6.1 UITGANGSPUNTEN EN RESULTATEN

6.1.1 UITGANGSPUNTEN

Gemiddelde snelheid (u_{gem})

De gemiddelde snelheid varieert bij een afvoer van T1 tussen 0,184 en 0,956 m/s met een mediaan van 0,668 m/s (zie bijlage 6).

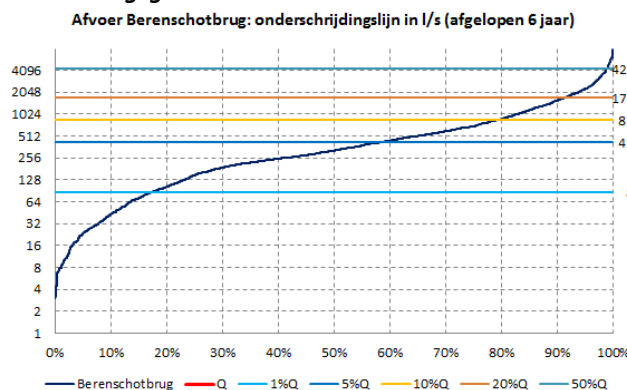
Mediaan (D_{50})

De spreiding van de korrelgrootte van het sediment (zand) is gemeten op 125-355 μ m met 200 μ m als mediaan.

Chezy (C)

Met een breedte van 4 m voor het fictieve doorstroomprofiel en een waterdiepte variërend van 12 cm tot 1,5 m, is het doorstroomoppervlakte en de natte omtrek te berekenen. Samen met een halve ribbelhoogte van 4cm voor K_s (K_s is 2) varieert de Chezy-waarde dan van 28 tot 48 volgens een parabool. De Chezy-waarde is zodoende geschat op 45 m^{0,5}/s.

Verhoudingsgetallen



Op de onderschrijdingsduurlijn zijn de afvoerdebieten 1, 5, 10, 20 en 50% maatgevend geprojecteerd.

Dit levert snijpunten op die samen de jaarlijkse afvoer in klassen opdeelt. Zo komen afvoeren tot 1% maatgevend 18% van 365 dagen (=66) voor.

1-5% -> 59-18 = 41% van 365 dagen (=150)

5-10% -> 79-59 = 20% van 365 dagen (=73)

10-20% -> 92-79 = 13% van 365 dagen (=47)

20-50% -> 99,7-92 = 7,7% van 365 dagen (=28)

50%-T -> 100-99,7 = 0,3% van 365 dagen (=1)

Figuur 18 Onderschrijdingsduurlijn ter bepaling van verhoudingsgetallen

Geulbreedte(b)

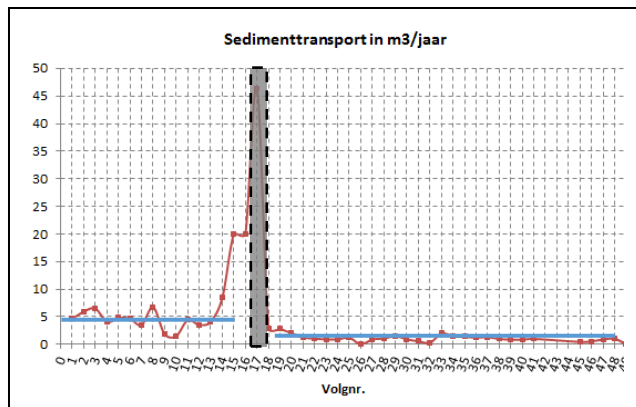
De geulbreedte is overwegend 4 m variërend tussen de 3 en 6 m (9m bij de zandvang Miste) (zie bijlage 6).

6.1.2 RESULTATEN

Transportcapaciteit

Als de transportcapaciteit uitgezet is in een grafiek, is te zien dat in het traject van de rijksgrens tot Stemerdingweg (leidingvak 17) de transportcapaciteit groter is dan daarna (zie figuur 23). Dit is mogelijk te verklaren door het grotere terrein-verhang (zie figuur 3). Tevens neemt op een deel van dit traject, net bovenstrooms van de Stemerdingweg, de transportcapaciteit sterk toe. Hieruit kan gesteld worden dat bovenstrooms van Stemerdingweg netto erosie optreedt en benedenstrooms netto sedimentatie.

De piek komt door het grote energieverhang dat ter plaatse veroorzaakt wordt door de “bult” in de bodem. De “bult” is nog een restant van de stuw die daar heeft gezeten. Het sterke energie verhang is over een korte afstand, maar wordt vergroot bij de koppeling van Sobek-data naar leidingvakken (zie figuur 14). Met het sterke energie verhang wordt hier het hoge energie verhang bij lage afvoer van leidingvak 17 bedoeld. Dit verhang heeft relatief veel invloed op het sedimenttransport per jaar, omdat het een groter aantal dagen voorkomt (zie “Verhoudingsgetallen” paragraaf 6.1).

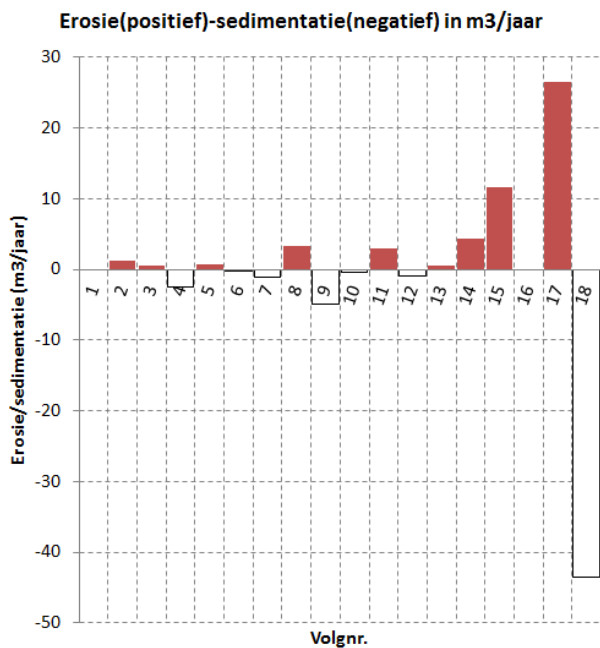


Figuur 19 Transportcapaciteit per leidingvak

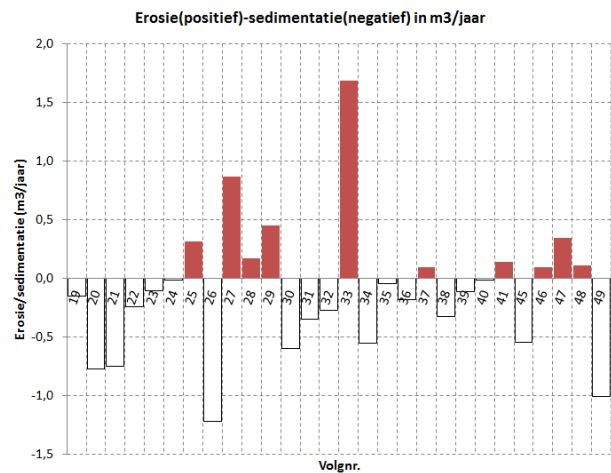
Netto erosie/ sedimentatie

Door de interpretatie voor netto erosie/sedimentatie (zie paragraaf 0) te maken is vast te stellen waar erosie of sedimentatie optreedt (zie figuren 21 en 22)

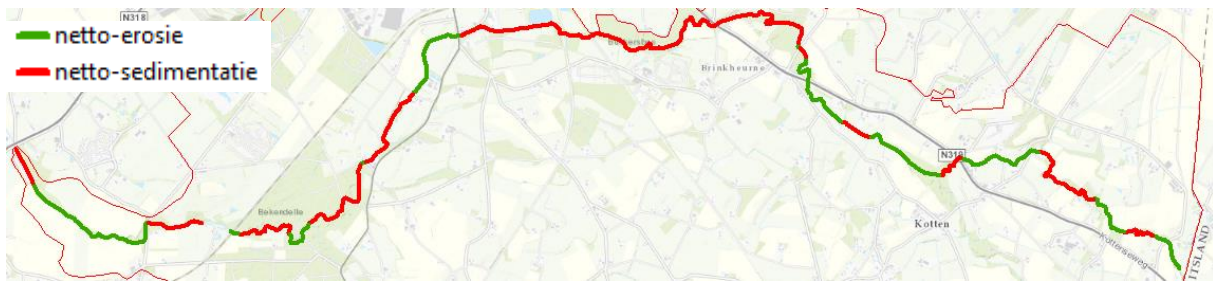
Vanaf benedenstrooms watermolen Den Helder (leidingvak 27) tot zandvang Miste (leidingvak 49) treedt afwisselend relatief weinig erosie en sedimentatie op met ordergrootte van -1,2 tot 1,7 m3/jaar en is er dus weinig variatie. Vanaf de rijksgrens tot en met leidingvak 12 is de variatie, met een ordergrootte van -4,9 tot 3,3 m3/jaar, groter en grilliger. Daartussen neemt de erosie sterk toe tot ca. 26,4 m3/jaar bij leidingvak 17, waarna het vervolgens door de afname in transportcapaciteit sedimenteert over een lang traject tot bovenstrooms van watermolen Den Helder. Het ruimtelijk verloop in netto erosie/-sedimentatie is weergegeven in figuur 23



Figuur 20 Netto erosie-sedimentatie (deel 1)



Figuur 21 Netto erosie-sedimentatie (deel 2)



Figuur 22 Ruimtelijk beeld van netto erosie/sedimentatie

6.2 VERIFICATIE

6.2.1 WAARNEMINGEN

6.2.1.1 VERBAND WAARNEMINGEN MET MODEL

Bij sedimenttransport treedt afkalving of ondergraving van de oevers op. Oeverafzetting duidt juist op afname van sedimenttransport. Hierbij moet opgemerkt worden dat bij oeverafzettingen ook spoeltransport kan zijn, hetgeen niet in de formule voor transportcapaciteit (Engelund & Hansen (1967)) is meegenomen.

Spoeltransport is oppervlakkige oevermateriaal dat via afstroming in de beek komt.

Oeverbegroeiing duidt op afwezigheid van grote sedimenttransport, aangezien dit anders begroeiing van oevers voorkomt. Stroomribbels (=bodemtransport) als beddingpatroon zegt niet of er sprake is van structurele erosie (=transport) of structurele sedimentatie, want zowel op banken kunnen stroomribbels aanwezig zijn, hetgeen duidt op sedimentatie, als op de bedding kunnen stroomribbels aanwezig zijn, hetgeen juist duidt op erosie.

6.2.1.2 VERGELIJKING MODEL EN WAARNEMINGEN

De modellen geultypen en netto erosie/sedimentatie zijn geclusterd naar dezelfde opeenvolgende uitkomsten. Vervolgens zijn voor deze clusters percentages/aantallen van waarnemingspunten gemaakt a.d.h.v. bijlage 11 "Waarnemingen". Waar in paragraaf 4.2.1 het model geultype eruit werd gelicht, ligt de focus nu op de netto erosie/sedimentatie.

Tabel 2 Verificatie van het model "Netto erosie/ -sedimentatie". De groene kolommen zijn de modelresultaten, gevolgd door de resultaten van de waarnemingen

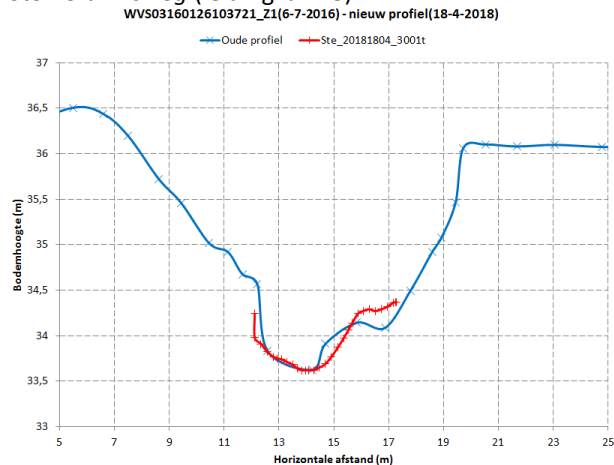
Leiding-vakken	Afstand t.o.v. rijkgrens (m)	Geultype 50% maatgevend	Netto erosie/ - sedimentatie	% Afkalving/ ondergraving oevers	% Oeverafzetting	Aantal banken
1 - 2	0 - 308	Meanderend met banken	netto-erosie	niet waargenomen		
3	308 - 426	Meanderend met banken	netto-erosie	90	10	2
4	426 - 709	Meanderend met banken	netto-sedimentatie	20	40	1
5	709 - 1108	Meanderend met banken	netto-erosie	10	40	1
6 - 7	1108 - 1876	Meanderend met banken	netto-sedimentatie	30	5	0
8	1876 - 2570	Meanderend met banken	netto-erosie	niet waargenomen		
9 - 10	2570 - 2858	Lateraal stabiel, geen banken	netto-sedimentatie	30	60	3
11	2858 - 3500	Meanderend met banken	netto-erosie	niet waargenomen		
12	3500 - 3750	Meanderend met banken	netto-sedimentatie	niet waargenomen		
13 - 14	3750 - 4481	Meanderend met banken	netto-erosie	niet waargenomen		
15	4481 - 4508	Meanderend met banken en meanderhalsafsnijding	netto-erosie	100	100	1
16	4508 - 4599	Meanderend met banken en meanderhalsafsnijding	netto-sedimentatie	0	0	2
17	4599 - 4634	Lateraal stabiel, geen banken	netto-erosie	0	0	0
18 - 20	4634 - 6397	Lateraal stabiel, geen banken	netto-sedimentatie	10	30	12
21 - 22	6397 - 7057	Lateraal stabiel, geen banken	netto-sedimentatie	5	10	1

Het leidingvak 15 is niet representatief voor de natuurlijke morfodynamische processen. Het betreft namelijk het heringerichte stuk in het kader van het project “Burloseweg” dat in 2016 is opgeleverd en waarvan de oevers nog niet geheel begroeid zijn. Vandaar het hoge percentage afkalvende-/ondergraven oevers en oeverafzettingen.

6.2.2 METINGEN

Hieronder zijn een zestal gemeten dwarsprofielen uitgezet tegenover een referentieprofiel. Voor plaatsbepalingen in de tekst, zie Bijlage 1.

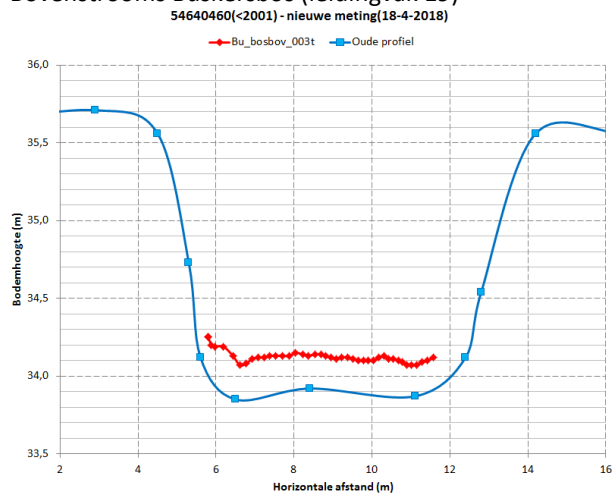
Stemerdinksweg (leidingvak 18)



Figuur 23 Vergelijking gemeten profiel bij waterstand 34,75 m+NAP en oud profiel uit 2016.

Volgens de theoretische analyse zou hier sedimentatie op moeten treden (zie figuur 23). Uit het dwarsprofiel figuur 24 lijkt dat er geen sprake is van netto erosie of -sedimentatie t.o.v. 2016 (gekeken naar de oppervlakten). De geul is niet dieper geworden. Het diepere gedeelte is wel breder, maar daar staat tegenover dat het deel ernaast weer ondieper is dan voorheen. Door de relatief lage waterstand kon de geul boven 34,75m+NAP helaas niet gemeten worden, waardoor niets te zeggen is over eventuele oevererosie.

Bovenstrooms Buskersbos (leidingvak 19)



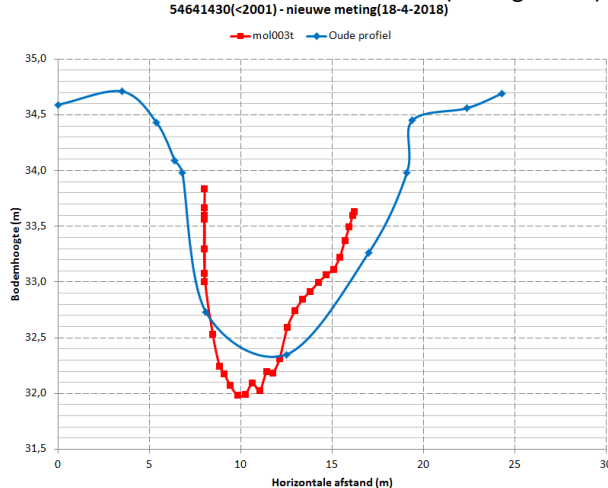
Figuur 24 Vergelijking gemeten profiel bij waterstand 34,31 m+NAP en oud profiel van voor 2001.

Deze meting is gedaan op een plek waar volgens de theoretische analyse netto sedimentatie op zou moeten treden.

Het water stond laag, waardoor niets te zeggen is over oevererosie. Echter de geul is wel ca. 20 cm ondieper geworden, waardoor gesteld kan worden dat er t.o.v. de oude meting, van vóór 2001, inderdaad netto sedimentatie heeft plaatsgevonden.

De temporele variatie, dus de veranderingen van de bodemhoogte in de tijd, zijn niet goed aan te geven met twee metingen. Daarvoor zijn meer frequente metingen nodig.

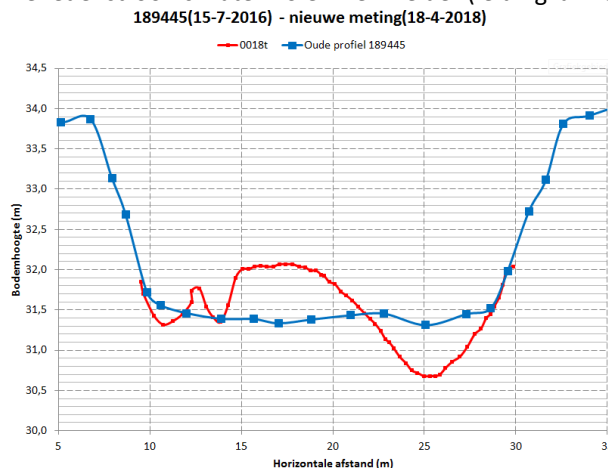
Bovenstrooms watermolen Den Helder (leidingvak 24)



Figuur 25 Vergelijking gemeten profiel bij waterstand 33,89 m+NAP en oud profiel van voor 2001.

Vlak voor de stuw is sedimentatie te verwachten vanwege de lagere stroomsnelheid en verhang van de waterlijn, hetgeen ook naar voren komt bij de theoretische analyse. Het profiel is bovenstrooms van het projectgebied van de renovatie van de stuw genomen. De twee profiellijnen laten zien dat de geul dieper en smaller is geworden. Het lijkt er op dat er lichte sprake is van netto sedimentatie. Hier ligt de nadruk op “lijkt”, want de lijnen zijn “theoretische” lijnen door de gemeten punten. De diepte op 10 m, horizontaal gezien, is niet gemeten ten tijde van de oude meting.

Benedenstrooms watermolen Den Helder (leidingvak 25)

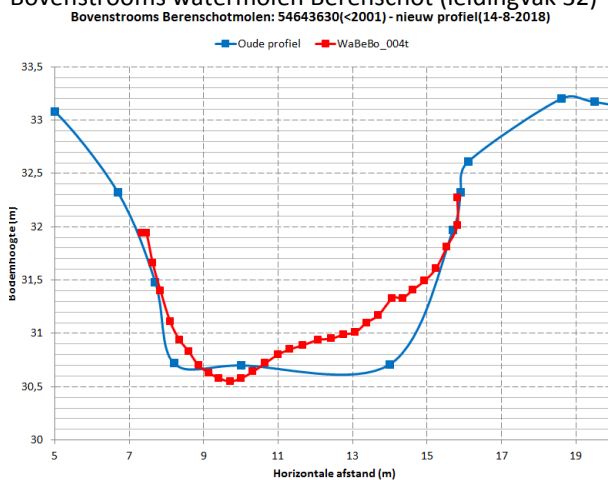


Figuur 26 Vergelijking gemeten profiel bij waterstand 32,33 m+NAP en oud profiel van 2016.

De locatie van dit profiel is gelegen in het midden, op het breedste deel, van de kolk van de watermolen. Hier is netto sedimentatie te verwachten.

Het profiel laat een wisselend beeld zien van erosie in het rechter deel en sedimentatie links ernaast. Er kan niet vastgesteld worden dat er netto sedimentatie (of erosie) plaatsvindt sinds 2016. Daarvoor is de periode te kort.

Bovenstrooms watermolen Berenschot (leidingvak 32)



Figuur 27 Vergelijking gemeten profiel bij waterstand 32,33 m+NAP en oud profiel van voor 2001.

Evenals bovenstrooms van watermolen Den Helder, is ook hier netto sedimentatie te verwachten. Het profiel is ook hier bovenstrooms van het projectgebied van de renovatie van de stuw genomen.

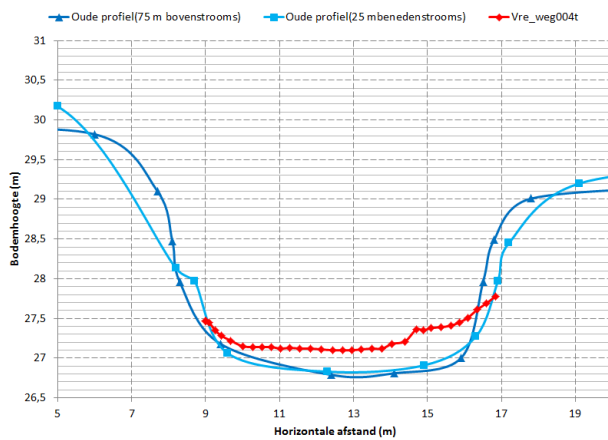
Buiten dat de geul op het diepste punt 10 tot 20 cm dieper is, is er zoals verwacht inderdaad vooral sprake van netto sedimentatie sinds de laatste meting van vóór 2001.

Benedenstrooms watermolen Berenschot (leidingvak 33)

Op de plek van het gemeten profiel uit 2016 is in maart 2018 gebaggerd. Het is daarom niet reëel om het nieuw gemeten profiel (na het baggeren) te vergelijken met het eerdere profiel in het kader van dit project.

Vreehorstweg (leidingvak 47)

72820(<2001)/54652260(<2001) - nieuwe meting(18-4-2018)



Figuur 28 Vergelijking gemeten profiel bij waterstand 27,98 m+NAP en oud profiel van voor 2001.

Volgens de theorie treedt hier erosie op, echter uit de waarnemingen komt naar voren dat hier netto sedimentatie optreedt van ca. 30 cm tot 45 cm aan de rechteroever, in vergelijking met een meting van vóór 2001. Evenals **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**, is niets te zeggen over de veranderingen in de tijd in verband met een te beperkt aantal metingen in deze periode.

Uit eigen waarneming blijkt dat de oevers afkalven en dat het materiaal blijft liggen voor de oever. Wellicht dat de transportcapaciteit te laag of al bereikt is om het materiaal in de stroming op te nemen.

6.3 VALIDATIE

Inzicht model

Op basis van het model transportcapaciteit is de Boven Slinge op te delen in een traject boven- en benedenstrooms van de Stermerdinksweg met achtereenvolgens netto erosie en netto sedimentatie.

Betrouwbaarheid model

Bij de verificatie waarnemingen is gekeken of deze theoretische opdeling is terug te zien in de waarnemingen. Bestaat er een verband tussen netto erosie/-sedimentatie en afkalving van/ ondergraving van oevers, oeverafzettingen en het aantal banken. Daarbij is te verwachten dat bij netto erosie sprake is van hogere percentages afgekalfde-/ ondergraven oevers, lagerepercentages oeverafzettingen en een kleiner aantal banken. Omgekeerd geldt dit ook voor netto sedimentatie (zie tabel 4).

Tabel 3 Verwachte relatie netto erosie/sedimentatie en waarnemingen

	% Afkalving/ ondergraving oevers	% Oeverafzetting	Aantal banken
Netto erosie	Toename	Afname	Afname
Netto sedimentatie	Afname	Toename	Toename

Deze veronderstelling klopt wat betreft de netto sedimentatie voor leidingvakken 9-10 en 18-21 (tabel 2) door vooral het aantal banken. Dat leidingvakken 9-10, ondanks de netto sedimentatie, toch een relatief hoog percentage afkalfende-/ ondergraven oevers hebben, heeft te maken heeft met de morfodynamiek in de buiten bochten.

De veronderstelling gaat niet op voor leidingvakken 4 en 5. Hier zijn vergelijkbare waarnemingen gedaan volgens tabel 2, terwijl bij de éne leidingvak in het model sprake is van netto erosie en de ander van netto sedimentatie.

De dwarsprofielen “Bovenstrooms Buskersbos (leidingvak 19)” en “Bovenstrooms watermolen Berenschot (leidingvak 32)” geven beide een beeld van netto-sedimentatie, overeenkomstig het model. Daarentegen laat “Vreehorstweg (leidingvak 47)” netto sedimentatie zien in plaats van netto-erosie.

Bepaling/ verwerking van de parameters

Evenals voor de overige modellen geldt hier voor de parameters gemiddelde snelheid de kanttekeningen, zoals genoemd onder “Kanttekeningen basis voor het Sobek model” in paragraaf 4.3. Hierbij gaat het over het

gebruik van een gedateerde legger, verschil tussen het legger- en werkelijke profiel en modellering van verstoringen.

De mediane korreldiameter (D_{50}) is een factor die omgekeerd evenredig is aan de transportcapaciteit. Indien met $200\mu\text{m}$ de waarde voor de mediaan te laag is en $350\mu\text{m}$ blijken te zijn, dan heeft de transportcapaciteit in dat geval een afwijking van 40%. Of in geval van een mediaan van $250\mu\text{m}$ wordt de afwijking op de transportcapaciteit -20%.

Voor de bepaling van de Chezy waarde is de nikuradse ruwheid de belangrijkste onbekende, die geschat is op basis van een halve ribbelhoogte van 4 cm. Indien uit was gegaan van $3 \cdot D_{90}$, met $D_{90} = 350\mu\text{m}$, dan was de Chezy waarde ca. $65\text{ m}^{0.5}/\text{s}$ geweest in plaats van $45\text{ m}^{0.5}/\text{s}$. Dit houdt een afwijking in van -73% op de transportcapaciteit.

De afwijkingen in transportcapaciteit, door een mogelijk verkeerde inschatting van de mediane korreldiameter of Chezy-waarde, hebben geen invloed op waar netto erosie/ sedimentatie optreedt. Het heeft wel invloed op de ordergrootte van netto erosie/sedimentatie, doordat deze berekend wordt door het verschil in transportcapaciteit van twee opeenvolgende leidingvakken. En dit verschil is anders bij een procentuele afwijking in transportcapaciteit.

Door deze resultaten, samen met de onzekere aspecten (zie “Verificatiemethode” onder paragraaf 4.3) bij het vergelijken van de gemeten dwarsprofiel met het referentieprofiel, kan het model netto erosie/sedimentatie niet voldoende gevalideerd worden.

Verificatiemethode

(zie ook “Verificatiemethode” onder paragraaf 4.3)

Het gebruik van dwarsprofielen m.b.v. de meetboot is positief, aangezien deze meer gemeten punten oplevert dan een doorsnede t.o.v. de traditionele manier. Wel is een goede kwaliteit van de GPS verbinding een punt van aandacht, evenals de laterale uitlijning op het oude profiel. Uitlijning is nu visueel gedaan, omdat de exacte ligging van het oude profiel niet betrouwbaar is als gevolg van de conversie van de kadastrale ondergrond naar het nieuwe GBKN (Grootschalige basiskaart Nederland). Hierdoor is het niet mogelijk te bepalen of een geul zich verplaatst en dus meandert.

Waarnemingen (en de vergelijkingen ervan) zijn zeer nuttig om een algemeen beeld te krijgen van de morfodynamiek. Ze dienen op een doordachte manier gekwalificeerd te worden, om vervolgens gebruikt te worden om modellen te valideren. De gekozen waarnemingspunten dienen gekoppeld te worden aan de kenmerkende eigenschappen van de modellen. Deze punten zijn echter niet altijd waarneembaar, zoals het beddingpatroon. Maar ook ondergraven oevers zijn niet altijd te zien als de waterstand hoog is.

7 MODEL BEDDINGVORM

7.1 UITGANGSPUNTEN EN RESULTATEN

7.1.1 UITGANGSPUNTEN

Schuifspanning (τ_b)

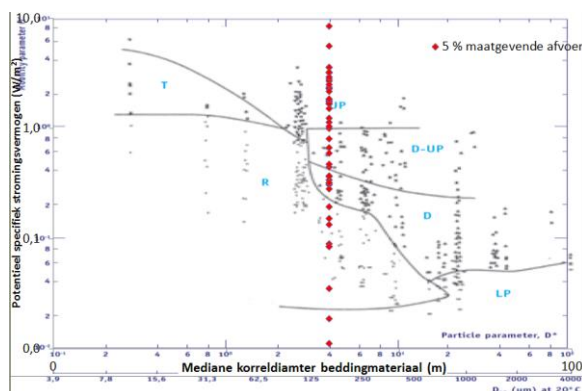
De schuifspanning is berekend bij het sedimenttransport, zie paragraaf 5.1.1. Dezelfde waarde wordt ook hier toegepast.

Korrel diameter (d)

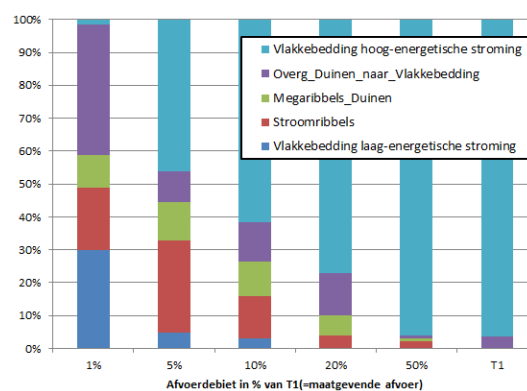
Voor de bepaling van de grenswaarden voor de mobiliteitsparameter is de mediaan(200 μ m) gebruikt als uitgangspunt. Zie voor de bepaling hoofdstuk 3.3.3

7.1.2 RESULTATEN

Uit het model komt naar voren dat bij 5% maatgevende afvoer is de bedding ca. 47% van de Boven Slinge vlak onder een hoog-energetische stroming. Dit loopt tot een afvoer van 50% maatgevende afvoer sterk op, waarna het stabiliseert, omdat dan bijna 100% van de bedding vlak is. Dit is weergegeven in onderstaande figuren. Dit verloop heeft een sterke overeenkomst met het sedimenttransport (wel/geen beweging, zie figuur 17), hetgeen begrijpelijk is daar de mobiliteitsparameter afgeleid is van de schuifspanning ($\theta = \tau_b / [(\rho_s - \rho)gd]$; zie paragraaf 3.1.4.2)



Figuur 29 Beddingvormen in de Boven Slinge per leidingvak bij 5% maatgevende afvoer.



Figuur 30 Beddingvorm van de Boven Slinge, gerekend naar %lengte van totaal (13km)

Opvallend is de grote spreiding van de resultaten: er zijn zowel extreem lage als hoge waarden voor de mobiliteitsparameter (zie figuur 30). De berekeningen zijn extra gecontroleerd zijn. Echter het blijft onduidelijk waar het verschil in spreiding vandaan komt, vergeleken met de puntenwolken waar het diagram op gebaseerd is.

In dezelfde mate waarin de vlakke bedding onder hoog-energetische stroming toeneemt, neemt de vlakke bedding onder laag-energetische stroming af. Verder valt op, dat bij 5% maatgevende afvoer (ca. 150 dagen/jaar), het percentage stroomribbels met bijna 30% relatief groot is en de bedding voor ca. 45% vlak is door toename in stroomsnelheid bij een grotere afvoer.

De “middenklassen” Megaribbels & Duinen en Overgang Duinen naar Vlakke bedding, lijken snel in elkaar over te gaan en bij toenemende afvoer over te gaan in Vlakke bedding.

In bijlage 10 “Beddingvorm” zijn de kaarten voor de verschillende afvoerdebieten opgenomen. Bovenstrooms van Buskersbos heeft de Boven Slinge al bij 5% maatgevende afvoer een bedding met de hoogste energieklasse (=mobiliteitsparameter) bereikt. Dit beeld komt overeen met het model sedimenttransport bij een maatgevende afvoer van 10% en heeft voornamelijk met het energieverhang te maken. Ook is de invloed van de stuwen, overlaat Berenschot en de vistrap bij Vreehorstweg te zien. Hier is de bedding vlak onder laag-energetische stroming.

7.2 VERIFICATIE

7.2.1 VERBAND WAARNEMINGEN MET MODEL

De laatste twee waarnemingspunten, beddingpatroon en banken, hebben een direct verband met de beddingvorm. Hoewel een bank ook een beddingvorm is valt deze buiten deze modellering van beddingvorm. Het onderscheid ligt in de duur van het bestaan. De beddingvormen onder deze modellering hebben een tijdelijk bestaan, afhankelijk van de afvoer. Banken hebben een duurzamer bestaan, ook na hoogwater.

7.2.2 VERGELIJKING MODEL EN WAARNEMINGEN

Tijdens de veldbezoeken bleek het beddingpatroon, op een aantal plekken na, vaak niet waar te nemen door hoog of troebel water. Daarom is het niet reëel om een vergelijking te maken tussen de uitkomsten van het model beddingpatroon en wat wordt gezien in de praktijk..

7.3 VALIDATIE

Inzicht model

Bij 5% maatgevende afvoer is een duidelijk onderscheid in energieklassen te zien tussen het deel bovenstrooms van Buskersbos en benedenstrooms ervan. Bovenstrooms bestaat de beddingen vrijwel volledig uit een vlakke bedding onder hoog energetische stroming, ten opzichte van beddingen met een lagere energieklassen benedenstrooms van Buskersbos.

Betrouwbaarheid model

Zoals reeds genoemd onder de resultaten (zie paragraaf 7.1.2) valt de grote spreiding op ten opzichte van de puntenwolken waar het diagram op gebaseerd is.

Op een aantal plekken zoals bij de zandvang Kottenseweg, zandtong en aan het begin van Buskersbos zijn bij ca. 10% maatgevende afvoer stroomribbels op de ondiepere delen van de bedding waargenomen (zie figuren 6, 7, 9 en 11). Op al deze plekken laat de kaart voor beddingvormen bij 10% maatgevende afvoer een vlakke bedding onder hoog energetische stroming zien. Een deel van de verklaring heeft wellicht te maken met de gevoeligheid voor de veranderingen van de waterdiepte door de lokale hoogteverschillen van de bedding. In werkelijkheid is er meer variatie in bodemhoogte dan in het theoretische leggerprofiel is opgenomen.

Het is niet mogelijk uitspraken te doen over de betrouwbaarheid van het model voor beddingvormen. Dit heeft te maken met het kleine aantal waarnemingen dat gedaan kon worden, waardoor verificatie niet goed mogelijk was. Daarnaast is op een aantal van de plekken waar wel waarneming mogelijk was een verschil tussen de uitkomsten van het model en wat in de praktijk werd waargenomen. Dit houdt in dat het model in ieder geval niet volledig de praktijksituatie kan voorspellen.

Bepaling/ verwerking van de parameters

Evenals voor de overige modellen geldt hier voor de parameters energieverhang en waterdiepte, ter bepaling van de schuifspanning (τ_b), de kanttekeningen, zoals genoemd onder “Kanttekeningen basis voor het Sobek model” in paragraaf 4.3. Hierbij gaat het over het gebruik van een gedateerde legger, verschil tussen het legger- en werkelijke profiel en modellering van verstoringen.

Verificatiemethode

Beddingvormen kunnen bij hoog water niet worden vastgesteld, omdat het dan meestal gepaard gaat met troebel water. Daarbij kunnen dwars op de bedding meerdere beddingvormen voorkomen, waardoor een vergelijking twijfelachtig is.

8 CONCLUSIE

Hoofdvraag

Wat zijn de karakteristieke eigenschappen van de Boven-Slinge met betrekking tot de morfodynamiek en zijn deze eigenschappen te voorspellen door een model, dusdanig dat op basis van dit model duurzame beheersmaatregelen getroffen kunnen worden?

Karakteristiek voor de Boven Slinge vanaf Nederlands/Duitse -grens tot zandvang Miste, is de grote bandbreedte van de voorkomende morfologische processen. Van netto erosie tot netto sedimentatie, van “lateraal stabiel” tot “meanderend met banken en meenderafsnijdingen”. Uit de verschillende modellen komt naar voren dat de Boven Slinge grofweg in drie trajecten kan worden opgedeeld. Dit geldt voor de modellen geultype, sedimenttransport en beddingvorm. De driedeling ontloopt elkaar daarbij niet veel. Deze trajecten lijken tevens een zeker verband te hebben met de morfologie van het omliggende landschap.

De theoretische modellen voorspellen de morfodynamiek, waarbij externe ‘menselijke’ factoren parameters zijn die de uitkomst van het model mede bepalen en dus kunnen worden meegewogen. Natuurlijke externe factoren zijn echter niet te voorspellen aan de hand van de modellen. Deze kunnen echter grote invloed hebben op de morfologische processen, waarbij een theoretische voorspelling van ‘lateraal stabiel’ in de praktijk ‘meanderend met banken’ laat zien.

Dit geeft vooral aan hoe dynamisch de morfologische processen zijn en dat de theoretische modellen geen harde grenzen hebben, maar eerder overgangszones.

De conclusie is dan ook dat de theoretische modellen voor een deel zeker bruikbaar zijn om de morfodynamiek en diens eigenschappen te voorspellen, maar dat de meer onvoorspelbare natuurlijke factoren die de processen meer dynamisch maken, steeds moeten worden meegewogen en geanalyseerd om duurzame beheersmaatregelen te kunnen treffen.

Enkel en alleen op het theoretische model is een dergelijk plan slechts beperkt van toepassing. Het is daarom van belang dat bij een herinrichting van de Boven Slinge, goed wordt gevolgd wat er op morfologisch vlak gebeurt. Immers de voorspelbaarheid van de morfologische veranderingen die zullen volgen uit een dergelijke herinrichting is beperkt.

Deelvraag 1 Hoe is de morfodynamiek ruimtelijk te modelleren?

De morfodynamiek is ruimtelijk te modelleren door middel van de modellen geultype, sedimenttransport, transportcapaciteit, netto erosie/sedimentatie en beddingvormen. De uitgangspunten voor deze modellen zijn het energieverhang, de maatgevende afvoer, waterdiepte, gemiddelde stroomsnelheid en de mediane korreldiameter. Deze zijn vast te stellen doorgebruik van de sedimentschijf, leggerprofielen, duurlijn(?) en te berekenen in Sobek.

Aan de hand van de ingevulde modellen en de parameters is op deze manier een indeling te maken van de Boven Slinge in grofweg drie verschillende trajecten. Het model geultype en sedimenttransport laat dit het meest duidelijk zien.

Op basis van de indeling in model Geultype zijn de volgende drie trajecten te onderscheiden:

1. Rijksgrens tot begin van Stemerdinksweg
2. Stemerdinksweg tot vispassage Broekmolen
3. Vispassage Broekmolen tot overlaat Berenschot

Op basis van de indeling in model Sedimenttransport (en tevens het model beddingvorm) zijn de volgende drie trajecten te onderscheiden:

1. Rijksgrens tot begin van Buskersbos
2. Beging Buskersbos tot bovenstrooms van vispassage Vreehorstweg
3. Vispassage Vreehorstweg tot overlaat Berenschot

De grotere invloed van de waterdiepte bij deze modellen, maakt dat de overgang net wat verderop in de rivier ligt.

Het model transportcapaciteit is een andersoortig model en verdeelt de Boven Slinge niet in trajecten zoals geultype, sedimenttransport en beddingvormen dat doen. Dit doordat gerekend wordt met verschillen in transportcapaciteit van opeenvolgende leidingvakken. Daardoor laat dit model meer wisselingen zien van netto erosie/-sedimentatie. Wel is op basis van de grootte van transportcapaciteit een onderscheid te maken tussen bovenstrooms en benedenstrooms van Stemerdingweg. Mogelijke verklaring is het verschil in terrein-verhang.

Deelvraag 2 Hoe is het model te verifiëren, welke waarnemingen en metingen zijn hiervoor geschikt?

Metingen:

Met het meten van dwarsprofielen is de morfodynamiek te verifiëren, meer specifiek de netto erosie/-sedimentatie en transportcapaciteit. Door met een meetboot met HDOP sensor en GPS, de gemeten waterdiepte te relateren aan het waterpeil en in een Excel-grafiek uit te zetten tegenover de afgelegde weg is een dwarsprofiel te maken. Wanneer dit in een grafiek wordt gecombineerd met een referentie-doorsnede is netto erosie/-sedimentatie te verifiëren.

Het verifiëren van het model geultype door het meten van dwarsprofielen is echter niet mogelijk, omdat een geultype een patroon beschrijft. Een dwarsprofiel weerspiegelt maar één punt op dit patroon. Met meerdere opeenvolgende metingen in bochten en op rechte stukken op een patroon zou het model voor geultype mogelijk wel geverifieerd kunnen worden.

Uit de verificatie van de verschillende modellen kwam naar voren dat de gebruikte metingen wisselend geschikt waren. Het meten van dwarsprofielen door middel van de meetboot met een GPS bol, is vrij betrouwbaar te noemen. Een precies recht dwarsprofiel is daarmee niet te verkrijgen, gezien de lichte afwijking door de stroming. Er zijn in het onderzoek zes dwarsprofielen gemeten en vergeleken met historisch referentie profielen. Een gebrek bij deze methode bleek de lage frequentie door de tijd waarmee deze metingen in het verleden gedaan zijn. Het aantal dwarsprofielen in de tijd en in de ruimte is te beperkt om conclusies te kunnen trekken. Een uitgebreider meetprogramma van dwarsprofielen is daarvoor nodig.

Het model beddingvorm is in dit onderzoek geverifieerd door waarnemingen. Aangezien dit echter, zie hieronder, niet betrouwbaar was, is het voor de toekomst een overweging om te kijken met of er meetmethodes (te ontwikkelen) zijn die model kunnen verifiëren.

Waarnemingen

Door bij waarnemingen in het veld te letten op specifieke kenmerken, zoals afkalvende-, ondergraven oevers, oeverafzettingen en banken gerelateerd aan de eigenschappen van het model, is het model niet eenduidig te verifiëren.

De visuele waarneming van banken, oeverafkalving, aanzanding, oeverbegroeiing zijn in principe betrouwbaar te noemen en kunnen dus goed worden ingezet. Een factor die de waarnemingen echter ingewikkeld maakt is de waterstand die soms hoog is, waardoor de bedding niet altijd zichtbaar is. Op verschillende momenten zijn daarmee in wisselende mate zaken als oeverondergraving waar te nemen. Het is dus van belang dat deze waarnemingen in een relatief kort tijdsbestek bij lagere waterstanden worden herhaald, zodat met deze wisseling rekening gehouden wordt. Het is daarbij van belang dat ook de onverwachte factoren, zoals de ingevallen boom, worden meegenomen!

Visuele waarneming van de beddingvormen bleek niet goed mogelijk door het troebele water. In de toekomst is wellicht waarneming door middel van onderwatercamera's een alternatief voor de waarnemingen met het oog die in dit onderzoek zijn gedaan.

Deelvraag 3 Voldoen de modellen en zijn ze betrouwbaar?

De modellen voldoen deels aan de opdracht om de morfodynamiek van de Boven Slinge te voorspellen, maar zijn niet volledig betrouwbaar. Dit maakt dat duurzame beheersmaatregelen niet blindelings op de modellen kunnen worden gebaseerd.

In het model zijn vele parameters in te voeren die uit gegevens van de beek bekend zijn en die de morfodynamiek deels voorspellen. Daarnaast zijn er echter enerzijds externe 'menselijke' factoren of kunstwerken, bijvoorbeeld van een stuw of vistrappen, die een zichtbaar invloed uitoefenen op de karakteristieke processen, en die wel te voorspellen zijn. Deze parameters worden immers binnen het Sobek-model meegenomen bij het berekenen van de uitgangspunten en worden dus meegewogen in de theoretische uitkomsten. Anderzijds zijn er echter ook natuurlijke externe factoren, zoals een ingevallen boom die een laterale bank veroorzaakt, die van invloed zijn op de morfodynamiek. Deze factoren zijn vooralsnog niet goed

mee te nemen in de gebruikte modellen, waardoor de morfologische kenmerken die zichtbaar zijn in het veld, niet te verklaren zijn met de theoretische modellen. Zo kan bijvoorbeeld de ingevallen boom een laterale bank veroorzaken, waardoor de uitkomst 'meanderend met banken' is, terwijl het theoretische model 'lateraal stabiel' als uitkomst geeft. Dit geeft vooral aan hoe dynamisch de morfologische processen zijn en dat de theoretische modellen geen harde grenzen hebben, maar eerder overgangszones.

De modellen zijn daardoor niet volledig betrouwbaar, omdat een te groot aantal factoren niet of onvoldoende worden meegenomen in de modellen, terwijl deze factoren in de praktijk een tegenovergestelde uitkomst van het model kunnen veroorzaken. Bij het bepalen van duurzame beheersmaatregelen zal, zoals hierboven al aangegeven, dus niet enkel naar de modellen gekeken moeten worden, maar is een bredere blik nodig.

Deelvraag 4 Welke karakteristieke eigenschappen komen uit de geverifieerde modellen naar voren? Aangezien de metingen van de modellen niet volledig geverifieerd konden worden is het niet mogelijk om de karakteristieke eigenschappen van het onderzochte traject van de Boven Slinge hiermee te beschrijven. Slechts een relatief klein deel van de uitkomsten van de modellen kwam overeen met de waarnemingen en metingen. Deze lieten de volgende karakteristieke eigenschappen zien. Wat betreft geultype bevestigen de waarnemingen in leidingvak 3 dat hier, conform het model, sprake is van een geultype meanderend met banken. Leidingvak 15 laat dit zelfde patroon zien, conform het model, echter is in verband met de recente ingrepen, niet representatief te noemen. Wat betreft het model sedimenttransport ontbreken voldoende verificatiemogelijkheden. Het model transportcapaciteit voorspelt voor de leidingvakken 9 tot 10 en 18 tot 21 de karakteristieke eigenschappen van een lateraal stabiel patroon zonder banken. Wat betreft de sedimentatie klopt dit. Er worden in een gedeelte van deze leidingvakken echter wel banken waargenomen (leidingvak 18). Dit is te verklaren door externe factoren zoals ingroeiende bomen en ingevallen takken. Voor het overige is het patroon dat wordt voorspeld door de modellen ook geverifieerd in de praktijk. De voorspelde variatie in patronen van lateraal stabiel zonder banken tot meanderend met banken en halsafsnijdingen en netto-sedimentatie tot netto- erosie is wel zichtbaar in de Boven Slinge, maar waar dit zichtbaar is en in welke mate blijkt in de praktijk regelmatig te verschillen met wat door de modellen wordt voorspeld.

9 AANBEVELINGEN

Vanuit het onderzoek en deze rapportage kunnen een aantal aanbevelingen gedaan worden. Een deel van de aanbevelingen is gericht op de duurzame herstelmaatregelen en een deel heeft te maken met suggesties voor vervolgonderzoek naar de morfodynamiek in de Boven Slinge.

Herstelmaatregelen

Op het huidige theoretische model is geen volledig plan van aanpak te maken omdat er teveel onvoorspelbare factoren zijn. Het is daarom van belang dat bij een herinrichting van de Boven Slinge, goed wordt gevolgd wat er op morfologisch vlak gebeurt. Immers de voorspelbaarheid van de morfologische veranderingen die zullen volgen uit een dergelijke herinrichting is beperkt.

Concreet voorbeeld van deze veranderingen is het volgen van hoe en hoe snel een mogelijke zandtong, die vrij is gekomen bij inrichtingswerkzaamheden als die bij het project “Burloseweg”, zich verplaatst.

Vervolgonderzoek

Om de morfodynamiek nog beter te kunnen voorspellen op basis van de modellen geultype, sedimenttransport, transportcapaciteit en beddingvorm is het goed te kijken naar de betrouwbaarheid van de parameters en de methode voor verificatie en validatie.

Voor de betrouwbaarheid is het van belang de bandbreedtes te kennen van de parameters waarop de modellen zijn gebaseerd en wat hun invloed is op de uitkomst. In dat kader kan bijvoorbeeld aandacht besteed kunnen worden aan de grootte van de Chezy waarde en de mediane korreldiameter voor de transportcapaciteit.

Wat zeer waarschijnlijk ook een betrouwbaarder beeld zal geven van de morfodynamiek in de Boven Slinge is door uit te gaan van een Sobek model dat gebruik maakt van een actueler legger profiel. Daarnaast is het de moeite waard te onderzoeken of externe natuurlijke invloeden meegenomen kunnen worden in het Sobek model.

Extra aandacht vraagt de koppeling van de parameters afvoer, energieverhang, waterdiepte en stroomsnelheid aan de leidingvakken binnen GIS. Daarbij kunnen de volgende vragen gesteld worden: hoe groot zijn de pieken in de waarden van deze parameters en hoe relevant zijn deze voor de morfodynamiek in de Boven Slinge? Welke lengte moeten de leidingvakken hebben?

Ter verificatie en validatie van de modellen is het goed om vooral frequenter te meten op de vooraf vast gestelde plekken. Bij gebruik van dwarsprofielen om het model geultype te kunnen verifiëren en valideren dienen meerdere opeenvolgende metingen op een patroon gemeten te worden, bijvoorbeeld afwisselend in bochten en op rechte stukken. Bij verificatie van geultype door waarnemingen is het verstandig bij veldbezoeken te letten op de combinatie van banken en oeverafkalving/ondergraving, liefst bij verschillende waterstanden.

Daarnaast kan extra gekeken worden welke meetmethoden geschikt zijn voor met name de modellen sedimenttransport en beddingvormen. Om beddingvormen, evenals ondergraven oevers, te kunnen waarnemen dienen veldbezoeken vooral bij laag water gedaan te worden.

Een zogenaamde “integrated sampler” kan een kwantitatieve beschrijving geven van sedimenttransport. (Een ‘integrated sampler’ is een soort fles dat sediment filtert uit het in- en uitstromende water.)

Bij de renovatie van de stuwen bij de watermolens Den Helder en Berenschot zijn de stuwen met een onder-doorlaat vervangen door een klepstuw. De verwachting is dat sediment zich bij normaal afvoer voor de stuw ophoopt en pas bij een hoge piekafvoer verder wordt getransporteerd. Een goed inzicht hierin is er echter nog niet. Dit is tevens een goed onderwerp voor vervolgonderzoek en brengt de morfodynamiek beter in kaart.

BIJLAGEN

Bijlage 0. REFLECTIE

In het kader van mijn afstudeeropdracht voor de opleiding Land- en Watermanagement aan de hogeschool Van Hall Larenstein, heb ik onderzoek gedaan naar de morfodynamische processen in de Boven Slinge.

In het verleden zijn er inrichtingsmaatregelen genomen in de Boven Slinge in het kader van beekherstel en het visvriendelijker maken van de beek. Zo zijn er opnieuw bochten, vistrappen aangelegd en stuwen vervangen. Dit samen met het grote verhang en sterke afvoerdynamiek van de Boven Slinge zorgen voor morfodynamische processen. In het kader van Natura2000, KRW en WB21 is de vraag welke beheermaatregelen getroffen kunnen worden om de beek duurzaam in stand te kunnen houden. Daarvoor is inzicht nodig van de morfodynamische processen.

Het doel van het onderzoek was het achterhalen wat de karakteristieke eigenschappen zijn van de Boven-Slinge met betrekking tot de morfodynamiek. En zijn deze eigenschappen te voorspellen door een model, dusdanig dat op basis van dit model duurzame beheersmaatregelen getroffen kunnen worden. In het kader van de afstudeeropdracht was het mijn taak een onderzoeksopzet en –plan te maken. Daarbij was het tijdens het uitvoeren van de opdracht de bedoeling zo nu en dan te reflecteren op de voortgang en of de uitgestippelde lijn nog werd gevolgd. De resultaten dienden begrijpelijk en leesbaar in een verslag gerapporteerd worden.

Er was bij aanvang een belemmering bij het maken van de onderzoeksopzet. Om morfodynamische processen goed in beeld te brengen is monitoring over een langere periode nodig. Deze tijd was binnen de afstudeeropdracht niet beschikbaar. Dit is ondervangen door een opzet te maken van modellen die de morfodynamiek beschrijven. Parameters zijn vastgesteld voor de Boven Slinge om in deze modellen te kunnen gebruiken. De uitkomsten zijn in diagrammen, grafieken en kaarten weergegeven om ze inzichtelijk te kunnen maken. Deze uitkomsten zijn geverifieerd en gevalideerd door waarnemingen en metingen in het veld. Deze modellen zouden dan in de toekomst tevens gebruikt kunnen worden om de morfodynamiek te voorspellen en wellicht te monitoren. Echter de theoretische modellen bleken slechts voor een deel bruikbaar om de morfodynamiek en de karakteristieke eigenschappen van de Boven Slinge te voorspellen. Een belangrijke oorzaak hiervoor waren de meer onvoorspelbare natuurlijke factoren die de processen meer dynamisch maken, maar die, in tegenstelling tot menselijke invloeden zoals een stuw, niet zijn meegenomen in het model.

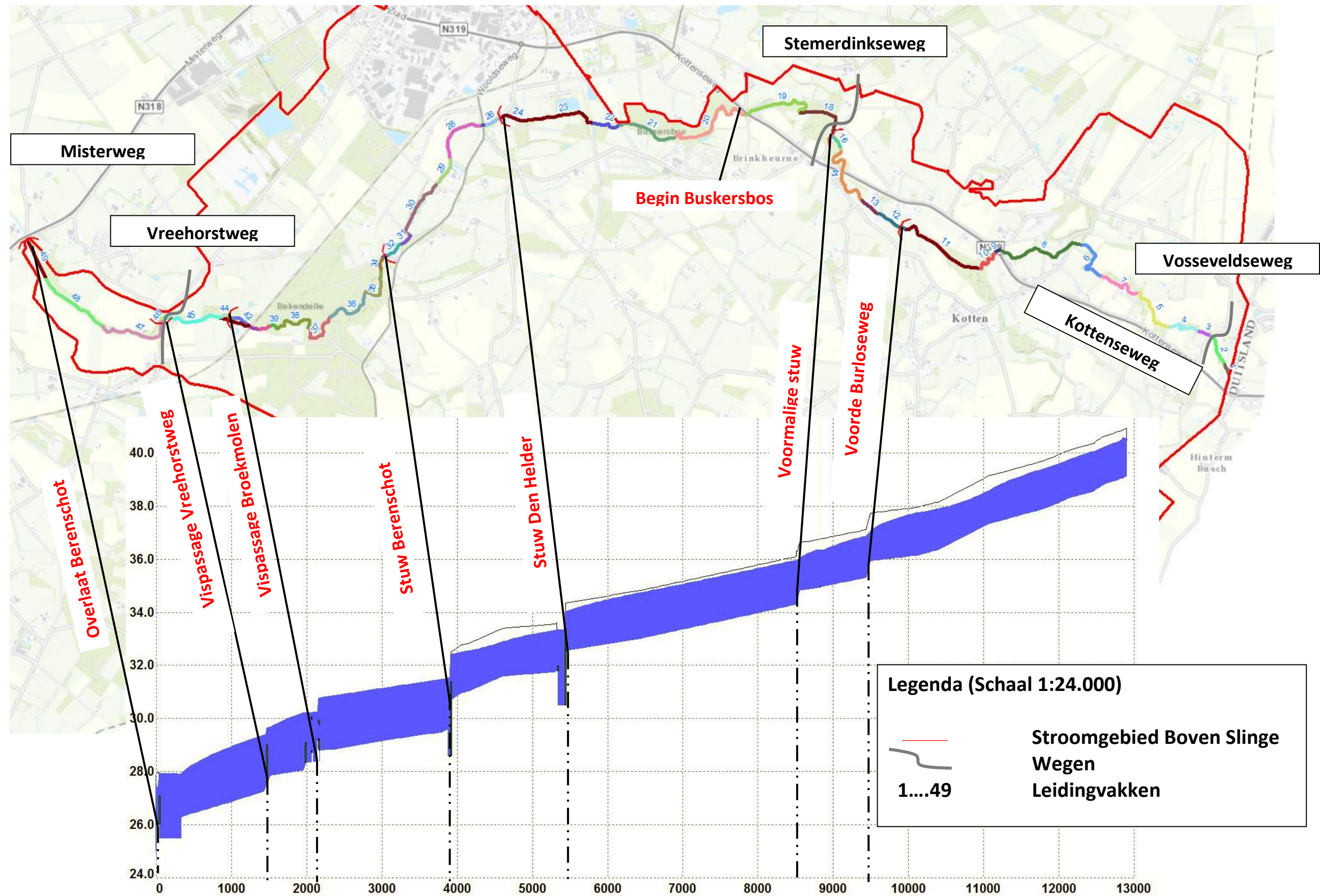
Ik merkte tijdens het onderzoek dat ik het lastig vond hoe om te gaan met deze onbetrouwbaarheid van de modellen. Dit gaf vooral in de eerste periode een frustratie over het nut van mijn onderzoek. Deze frustratie heeft waarschijnlijk te maken met mijn technische achtergrond, waarbij ik gewend ben om aan de hand van modellen met een (veel grotere) mate van betrouwbaarheid situaties en effecten te kunnen voorspellen. Ik heb geleerd onzekerheden in uitkomsten te zien als bandbreedtes, die mogelijk te verklaren zijn. Dit proces geeft juist meer inzicht waar je weer in een vervolg onderzoek wat hebt, in plaats van dat een onderzoek ‘niet gelukt’ zou zijn. Een goede opbouw en structuur in het rapport, maakt dat je stapsgewijs nadenkt over wat wel en wat niet zeker is in het onderzoek.

Ik heb van dit onderzoek geleerd om vanuit de theorie een model op te zetten en hoe de uitgangspunten hiervoor vast te stellen zijn. Deze zijn met een bepaalde mate van onzekerheid vast te stellen. Daarnaast heb ik geleerd hoe deze theoretische uitkomsten in de praktijk te kunnen verifiëren met diverse meetmethodes. Daarbij bleek dat je bij methodes die op papier geschikt kunnen lijken, in de praktijk toch op belemmeringen kan stuiten. Als hier geen alternatief voor is, biedt ook dat weer mogelijkheden voor vervolgonderzoek.

Met dit rapport heb ik, mede dankzij mijn begeleiders, gestructureerd en leesbaar de resultaten, conclusies en aanbevelingen gedocumenteerd. Dit op een beduidend andere, meer omschrijvende wijze, dan ik vanuit mijn technische achtergrond gewend ben. Het kostte, ondanks de verslagen die tijdens de studie uiteraard al geschreven zijn, toch weer moeite om deze omslag te maken. Opnieuw mede dankzij de feedback van mijn begeleiders ben ik hier naar mijn mening uiteindelijk goed in geslaagd en ben ik tevreden over het onderzoeksrapport dat nu is afgerond. Er zat veel tijd en energie in, hetgeen maakt dat dit resultaat voldoening geeft.

Ik was., deels door de gevoelde frustratie, wat laat met het vinden van de een juiste structuur en opzet van mijn verslag, waardoor het uiteindelijk toch nog onder zekere tijdsdruk moest gebeuren. Met de ervaringen die ik tijdens het onderzoek en het schrijven van dit rapport heb opgedaan, ga ik er vanuit dat dit een volgende keer geen punt meer zal zijn.

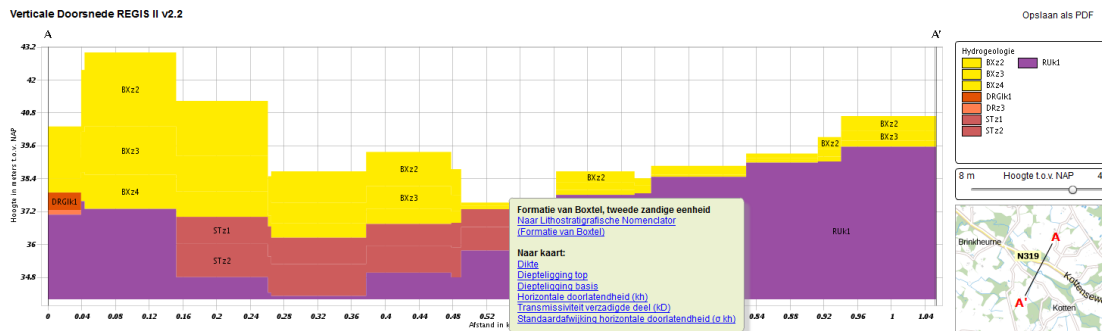
Bijlage 1. OVERZICHTSKAART



Bijlage 2. RUIMTELIJKE ANALYSE

Geomorfologie en bodem

Onderzoek in Dinoloket wijst uit dat de geul in het Laagpakket van Sinkgraven ligt (zie figuur @). Deze duidt op: zand, zeer fijn tot zeer grof, soms siltig of grindhoudend; leem, veelal zandig; klei, humeus; veen; detritusgyttja (Dinoloket, 2018)



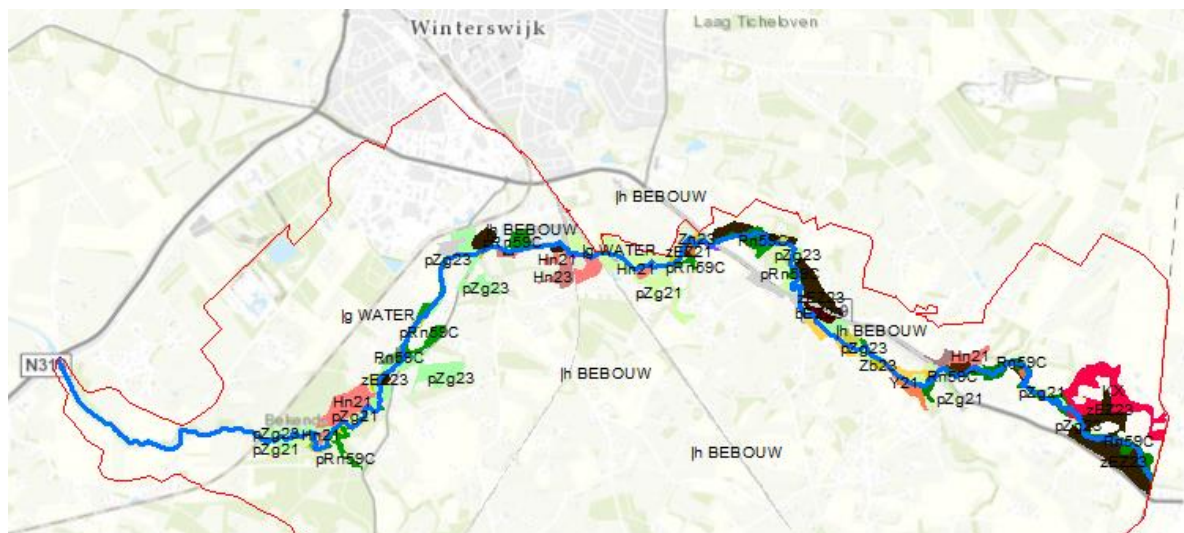
Figuur 31 Stroming van de Boven Slinge door Laagpakket van Sinkgraven (2018, Dinokoket.nl)

Op de bodemkaart 1:10.000 is te zien dat de Boven Slinge overwegend stroomt door zandige gronden als de beekeerdgronden (pZg), gooreerdgronden (pZn) en gronden van rivierklei, zoals poldervaag- of leek-/woudeerdgronden (resp. Rn en pRn).

De zandige gronden hebben een textuur van fijn, leemarm en zwak lemig zand tot fijn, lemig zand. Het heeft een zandfractie (M50) van 50-210 micron en een leemfractie tussen 10-50%.

De kleigronden bestaan uit zavel met een lutumgehalte tussen 8-25%. Het profielverloop is een combinatie van “klei op zand” en aflopend of enkel een van deze.

De beek wordt geflankeerd door enkeerd-, veldpodzol- en looppodzolgronden.



Figuur 32 Strooming van de Boven Slinge door zand- en rivierkleigronden, geflankeerd door podzol- en enkeerdgronden.

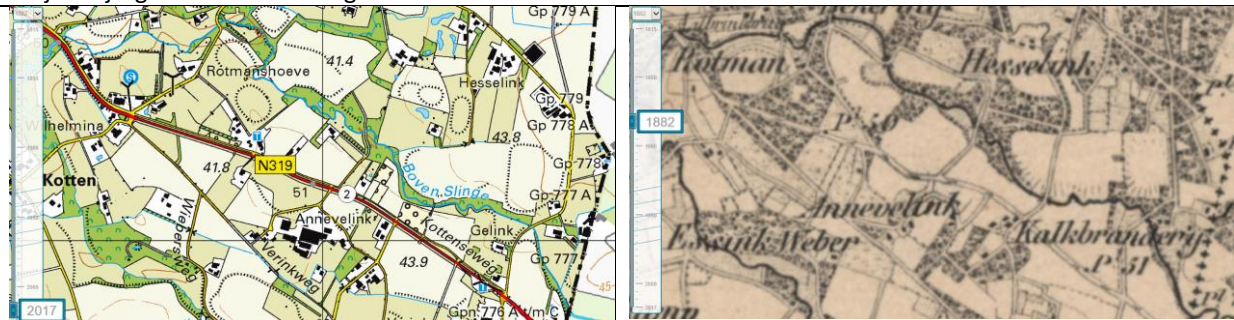
Ten zuidwesten van Winterswijk is een band van “Plateau-achtige vereffeningsrest” (5F13) verschijnselen te zien. Daardoorheen, t.p.v. de overlaat Berenschot, loopt het de Boven Slinge. Hier zijn relatief grotere variaties in hoogten tussen de 5-12,5 m. De beek stroomt door een dal (2R7) met meanderruggen en geulen. De breedte van het dal geeft hierbij de bandbreedte aan waarin de Boven Slinge zich in het verleden heeft kunnen verplaatsen. Naast het beekdal zijn er dekzandruggen ontstaan in het Laat-Pleistoceen en Holoceen, met hoogteverschillen van 0,5-1,5 m en 1,5-5 m (3K14 en 4K14, danwel 3L5). Dit ligt in een landschap van vereffeningsrest-welvingen (3L23), vereffeningsrestglooiingen (4H2) en een terrasvlakte (2M18b; lichtgroene bij t.p.v. de Burloseweg) van het Winterswijk Plateau dat al in het pre-Pleistoceen is ontstaan.

Historie en topografie

In 1876 is de rivier de Oude IJssel (waar de Boven Slinge deel van uitmaakt) door het Rijk overgedragen aan de provincie Gelderland. Toen was het zwaar verwaarloosd en was het in een natuurlijke toestand, zoals het vanaf de middeleeuwen ook was. Om een indruk te krijgen van de natuurlijke morfodynamiek van de beek is daarom een kaart beschouwd vanuit deze periode en om precies te zijn van 1882, vanwege zijn duidelijkheid. Dit is vergeleken met de kaart uit 2017.

Bovenstreams van de Kottenseweg zijn meer slingers met een grotere amplitude en overwegend scherpere bochten gekomen t.o.v. 1882. Dit geldt ook voor het benedenstreams van de Kottenseweg, maar daarna tot aan de Rietbrug, waren er juist in 1882 meer gelijkmatig verdeelde slingers/bochten aanwezig in de Boven Slinge. Daar waar net voorbij de Rietbrug recent in 2015 een slinger aangelegd is, was het voorheen recht. Voorbij de Stermerdinksweg zaten in 1882 een tweetal grote kronkels. Vanaf Buskersbos tot en met watermolen Den Helder waren de bochten destijds flauwer. Tussen de beide molens (Den Helder en Berenschot) is relatief weinig veranderd. Net voorbij watermolen Berenschot zat een slinger die naar alle waarschijnlijkheid rechtgetrokken is. Daarna heeft met name een bocht zich verder ontwikkeld. Verderop hebben kleinere bochten zich ontwikkeld.

Traject rijksgrens - Kottenseweg



Traject Kottenseweg - Stermerdinksweg



Traject Stermerdinksweg - Buskersbos

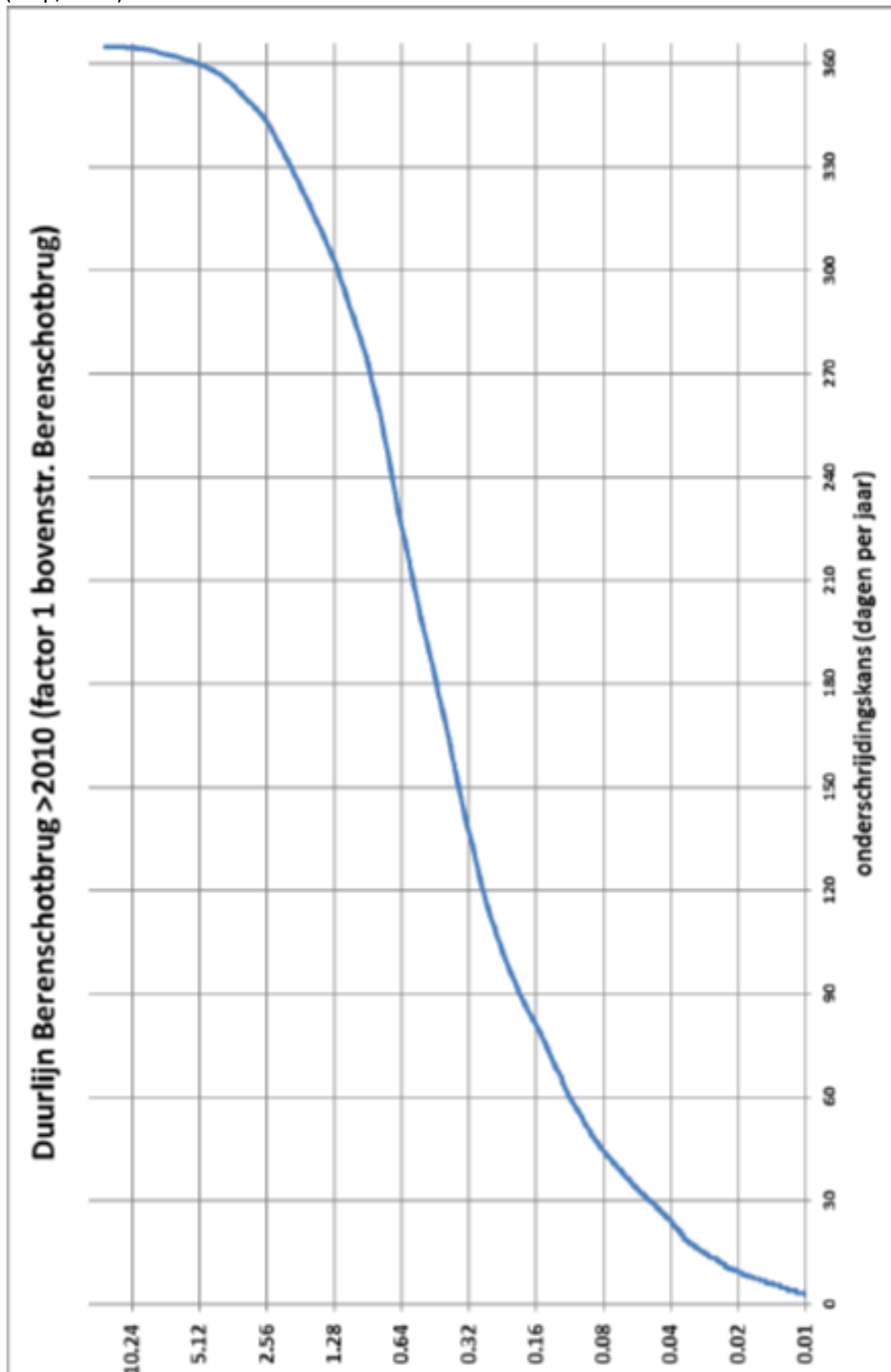


Traject watermolen Berenschot – zandvang Miste



Bijlage 3. ONDERSCHRIJDINGSKANS AFVOER OVERLAAT BERENDSCHOT

(Klop, 2017)



Bijlage 4. DATA GEULTYPE

volgord	Se 1%	Q1%	Se 5%	Q5%	Se 10%	Q10%	Se 20%	Q20%	Se 50%	Q5%
1	0,001	0,055	0,001	0,276	0,001	0,552	0,001	1,105	0,001	0,001
2	0,001	0,055	0,001	0,277	0,001	0,554	0,001	1,107	0,001	0,001
3	0,002	0,055	0,002	0,277	0,001	0,554	0,001	1,108	0,001	0,001
4	0,001	0,056	0,001	0,278	0,001	0,555	0,001	1,111	0,001	0,001
5	0,001	0,056	0,001	0,278	0,001	0,557	0,001	1,114	0,001	0,001
6	0,001	0,056	0,001	0,279	0,001	0,559	0,001	1,117	0,001	0,001
7	0,001	0,056	0,001	0,278	0,001	0,557	0,001	1,114	0,001	0,001
8	0,001	0,057	0,001	0,287	0,001	0,574	0,001	1,149	0,001	0,001
9	0,001	0,058	0,001	0,289	0,001	0,577	0,001	1,155	0,001	0,001
10	0,001	0,058	0,000	0,289	0,000	0,578	0,000	1,155	0,000	0,000
11	0,000	0,067	0,001	0,335	0,001	0,670	0,001	1,338	0,001	0,001
12	0,001	0,068	0,001	0,339	0,001	0,677	0,001	1,353	0,001	0,001
13	0,001	0,068	0,001	0,340	0,001	0,680	0,001	1,359	0,001	0,001
14	0,001	0,069	0,001	0,341	0,001	0,681	0,001	1,361	0,001	0,001
15	0,001	0,069	0,002	0,342	0,002	0,683	0,002	1,366	0,002	0,002
16	0,001	0,069	0,002	0,342	0,002	0,683	0,002	1,366	0,002	0,002
17	0,010	0,069	0,009	0,342	0,006	0,683	0,003	1,366	0,001	0,001
18	0,001	0,069	0,001	0,343	0,001	0,686	0,001	1,371	0,001	0,001
19	0,001	0,069	0,001	0,345	0,001	0,690	0,001	1,380	0,001	0,001
20	0,000	0,069	0,000	0,345	0,000	0,690	0,000	1,380	0,001	0,001
21	0,000	0,069	0,000	0,347	0,000	0,693	0,000	1,386	0,000	0,000
22	0,000	0,071	0,000	0,353	0,000	0,706	0,000	1,413	0,000	0,000
23	0,000	0,071	0,000	0,354	0,000	0,709	0,000	1,418	0,000	0,000
24	0,000	0,071	0,000	0,354	0,000	0,709	0,000	1,418	0,000	0,000
25	0,000	0,071	0,000	0,354	0,000	0,709	0,000	1,418	0,000	0,000
26	0,000	0,071	0,000	0,355	0,000	0,709	0,000	1,419	0,000	0,000
27	0,000	0,071	0,000	0,355	0,000	0,709	0,000	1,419	0,000	0,000
28	0,000	0,072	0,000	0,359	0,000	0,718	0,000	1,437	0,000	0,000
29	0,000	0,072	0,000	0,360	0,000	0,720	0,000	1,440	0,000	0,000
30	0,000	0,072	0,000	0,360	0,000	0,721	0,000	1,441	0,000	0,000
31	0,000	0,075	0,000	0,375	0,000	0,751	0,000	1,502	0,000	0,000
32	0,000	0,088	0,000	0,384	0,000	0,762	0,000	1,524	0,000	0,000
33	0,001	0,088	0,001	0,384	0,001	0,762	0,001	1,524	0,001	0,001
34	0,000	0,089	0,000	0,391	0,000	0,776	0,000	1,551	0,000	0,000
35	0,000	0,090	0,000	0,392	0,000	0,778	0,000	1,556	0,000	0,000
36	0,000	0,090	0,000	0,392	0,000	0,780	0,000	1,559	0,000	0,000
37	0,000	0,094	0,000	0,411	0,000	0,817	0,000	1,633	0,000	0,000
38	0,000	0,095	0,000	0,412	0,000	0,818	0,000	1,635	0,000	0,000
39	0,000	0,096	0,000	0,419	0,000	0,832	0,000	1,663	0,000	0,000
40	0,000	0,096	0,000	0,419	0,000	0,832	0,000	1,663	0,000	0,000
41	0,000	0,097	0,000	0,421	0,000	0,838	0,000	1,674	0,000	0,000
45	0,000	0,098	0,000	0,423	0,000	0,841	0,000	1,681	0,001	0,001

Bijlage 5. DATA SEDIMENTTRANSPORT

volgorde	Se1%	h 1%	Se5%	h 5%	Se10%	h 10%	Se20%	h 20%	Se50%	h 50%	Se100%	h 100%
1	0,00	0,10	0,00	0,22	0,00	0,31	0,00	0,45	0,00	0,77	0,00	1,20
2	0,00	0,10	0,00	0,22	0,00	0,31	0,00	0,45	0,00	0,77	0,00	1,20
3	0,00	0,09	0,00	0,22	0,00	0,33	0,00	0,50	0,00	0,86	0,00	1,29
4	0,01	0,05	0,01	0,14	0,01	0,24	0,00	0,41	0,00	0,82	0,00	1,32
5	0,00	0,07	0,00	0,24	0,00	0,37	0,00	0,55	0,00	0,90	0,00	1,33
6	0,00	0,67	0,00	0,76	0,00	0,77	0,00	0,82	0,00	1,02	0,00	1,34
7	0,00	1,00	0,00	1,09	0,00	1,08	0,00	1,10	0,00	1,16	0,00	1,34
8	0,00	0,11	0,00	0,26	0,00	0,39	0,00	0,57	0,00	0,94	0,00	1,36
9	0,00	0,12	0,00	0,30	0,00	0,43	0,00	0,62	0,00	0,97	0,00	1,37
10	0,00	0,14	0,00	0,32	0,00	0,45	0,00	0,63	0,00	0,99	0,00	1,38
11	0,00	0,09	0,00	0,25	0,00	0,38	0,00	0,57	0,00	0,96	0,00	1,39
12	0,00	0,12	0,00	0,29	0,00	0,42	0,00	0,61	0,00	0,98	0,00	1,40
13	0,00	0,11	0,00	0,27	0,00	0,41	0,00	0,61	0,00	1,00	0,00	1,43
14	0,00	0,12	0,00	0,29	0,00	0,42	0,00	0,62	0,00	1,00	0,00	1,43
15	0,00	1,37	0,00	1,42	0,00	1,44	0,00	1,42	0,00	1,42	0,00	1,44
16	0,00	0,12	0,00	0,30	0,00	0,44	0,00	0,64	0,00	1,03	0,00	1,46
17	0,00	0,12	0,00	0,31	0,00	0,45	0,00	0,65	0,00	1,03	0,00	1,47
18	0,00	0,59	0,00	0,69	0,00	0,71	0,00	0,81	0,00	1,09	0,00	1,47
19	0,00	1,28	0,00	1,37	0,00	1,36	0,00	1,37	0,00	1,39	0,00	1,48
20	0,00	1,30	0,00	1,35	0,00	1,37	0,00	1,36	0,00	1,39	0,00	1,49
21	0,00	0,11	0,00	0,28	0,00	0,43	0,00	0,64	0,00	1,06	0,00	1,51
22	0,00	0,12	0,00	0,31	0,00	0,46	0,00	0,67	0,00	1,07	0,00	1,51
23	0,00	0,56	0,00	0,66	0,00	0,69	0,00	0,81	0,00	1,12	0,00	1,53
24	0,00	0,11	0,00	0,31	0,00	0,47	0,00	0,68	0,00	1,09	0,00	1,53
25	0,00	1,48	0,00	1,56	0,00	1,55	0,00	1,56	0,00	1,55	0,00	1,58
26	0,00	1,15	0,00	1,20	0,00	1,23	0,00	1,23	0,00	1,34	0,00	1,59
27	0,00	0,12	0,00	0,31	0,00	0,46	0,00	0,69	0,00	1,13	0,00	1,63
28	0,00	0,13	0,00	0,32	0,00	0,48	0,00	0,70	0,00	1,14	0,00	1,64
29	0,00	0,38	0,00	0,48	0,00	0,58	0,00	0,76	0,00	1,17	0,00	1,65
30	0,00	0,95	0,00	1,01	0,00	1,04	0,00	1,08	0,00	1,30	0,00	1,67
31	0,00	0,74	0,00	0,80	0,00	0,85	0,00	0,93	0,00	1,24	0,00	1,67
32	0,00	1,17	0,00	1,23	0,00	1,28	0,00	1,37	0,00	1,56	0,00	1,79
33	0,00	0,60	0,00	0,70	0,00	0,81	0,00	1,00	0,00	1,40	0,00	1,85
34	0,00	0,65	0,00	0,95	0,00	1,03	0,00	1,17	0,00	1,50	0,00	1,92
35	0,00	0,23	0,00	0,54	0,00	0,69	0,00	0,92	0,00	1,39	0,00	1,94
36	0,00	0,17	0,00	0,46	0,00	0,63	0,00	0,88	0,00	1,38	0,00	1,94
37	0,00	0,33	0,00	0,64	0,00	0,77	0,00	0,97	0,00	1,42	0,00	1,94
38	0,00	0,17	0,00	0,43	0,00	0,61	0,00	0,87	0,00	1,37	0,00	1,94
39	0,00	1,09	0,00	1,15	0,00	1,21	0,00	1,32	0,00	1,60	0,00	1,94
40	0,00	0,50	0,00	0,80	0,00	0,90	0,00	1,08	0,00	1,48	0,00	1,96
41	0,00	0,64	0,00	0,93	0,00	1,02	0,00	1,17	0,00	1,53	0,00	1,98

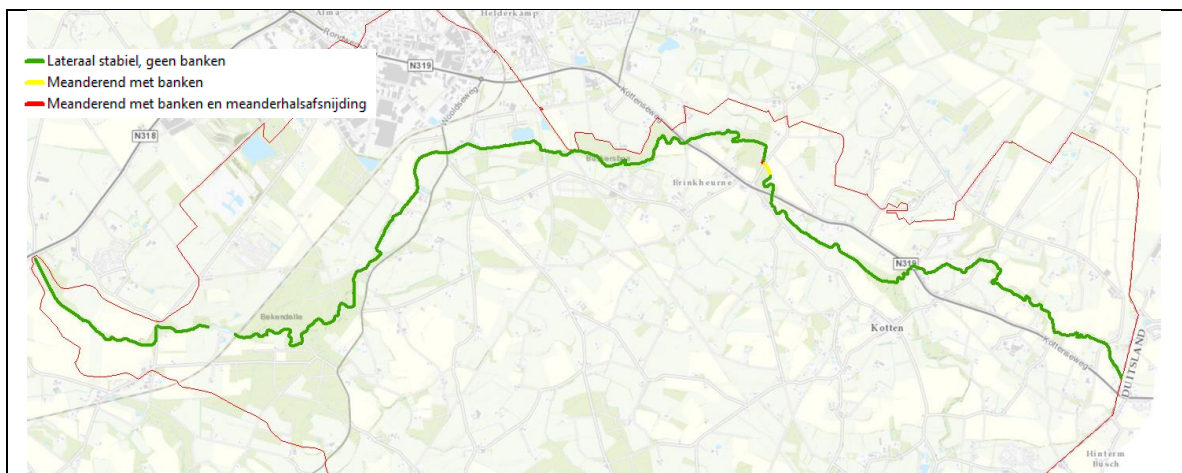
Bijlage 6. DATA TRANSPORTCAPACITEIT

volgorde	b	u_gem1%	u_gem5%	u_gem10%	u_gem20%	u_gem50%	u_gem_100%
1	3	0,145	0,277	0,360	0,462	0,629	0,790
2	3	0,159	0,299	0,386	0,491	0,656	0,815
3	3	0,193	0,330	0,410	0,503	0,655	0,807
4	3	0,147	0,273	0,354	0,451	0,611	0,769
5	3	0,166	0,298	0,377	0,470	0,624	0,780
6	3	0,148	0,272	0,354	0,456	0,634	0,810
7	3	0,147	0,267	0,343	0,435	0,593	0,756
8	4	0,163	0,302	0,385	0,482	0,628	0,760
9	4	0,133	0,230	0,288	0,361	0,493	0,630
10	4	0,123	0,208	0,264	0,339	0,475	0,616
11	4	0,114	0,228	0,309	0,414	0,602	0,789
12	4	0,132	0,241	0,314	0,405	0,567	0,730
13	4	0,131	0,245	0,321	0,416	0,586	0,754
14	4	0,164	0,289	0,374	0,486	0,675	0,847
15	4	0,148	0,320	0,439	0,590	0,807	0,956
16	4	0,148	0,320	0,439	0,590	0,807	0,956
17	4	0,313	0,563	0,660	0,717	0,793	0,881
18	4	0,134	0,245	0,314	0,397	0,540	0,676
19	4	0,131	0,238	0,307	0,392	0,537	0,675
20	4	0,040	0,153	0,244	0,356	0,520	0,669
21	4	0,018	0,083	0,155	0,279	0,485	0,662
22	4	0,014	0,064	0,123	0,235	0,464	0,673
23	4	0,011	0,051	0,100	0,199	0,446	0,712
24	4	0,009	0,044	0,087	0,176	0,427	0,769
25	5	0,009	0,042	0,082	0,166	0,416	0,818
26	5	0,004	0,020	0,038	0,071	0,147	0,239
27	6	0,018	0,077	0,146	0,244	0,414	0,573
28	6	0,018	0,074	0,143	0,246	0,430	0,600
29	6	0,015	0,066	0,132	0,241	0,463	0,664
30	6	0,010	0,044	0,088	0,172	0,404	0,679
31	6	0,008	0,036	0,072	0,143	0,353	0,655
32	6	0,007	0,030	0,060	0,120	0,301	0,591
33	4	0,170	0,235	0,294	0,367	0,496	0,623
34	4	0,126	0,195	0,258	0,337	0,475	0,610
35	4	0,122	0,183	0,251	0,333	0,475	0,613
36	4	0,091	0,150	0,225	0,316	0,469	0,614
37	4	0,063	0,129	0,207	0,309	0,481	0,642
38	4	0,040	0,099	0,170	0,273	0,457	0,633
39	4	0,032	0,086	0,151	0,252	0,447	0,637
40	4	0,031	0,084	0,148	0,249	0,445	0,639

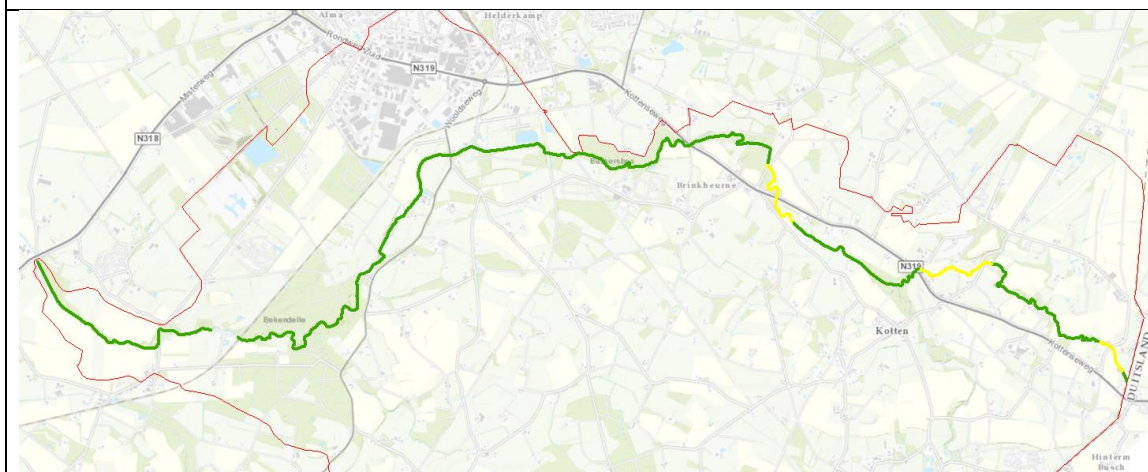
Bijlage 7. DATA BEDDINGVORM

volgorde	Se1%	h 1%	Se5%	h 5%	Se10%	h 10%	Se20%	h 20%	Se50%	h 50%	Se100%	h 100%
1	0,00	0,10	0,00	0,22	0,00	0,31	0,00	0,45	0,00	0,77	0,00	1,20
2	0,00	0,10	0,00	0,22	0,00	0,31	0,00	0,45	0,00	0,77	0,00	1,20
3	0,00	0,09	0,00	0,22	0,00	0,33	0,00	0,50	0,00	0,86	0,00	1,29
4	0,01	0,05	0,01	0,14	0,01	0,24	0,00	0,41	0,00	0,82	0,00	1,32
5	0,00	0,07	0,00	0,24	0,00	0,37	0,00	0,55	0,00	0,90	0,00	1,33
6	0,00	0,67	0,00	0,76	0,00	0,77	0,00	0,82	0,00	1,02	0,00	1,34
7	0,00	1,00	0,00	1,09	0,00	1,08	0,00	1,10	0,00	1,16	0,00	1,34
8	0,00	0,11	0,00	0,26	0,00	0,39	0,00	0,57	0,00	0,94	0,00	1,36
9	0,00	0,12	0,00	0,30	0,00	0,43	0,00	0,62	0,00	0,97	0,00	1,37
10	0,00	0,14	0,00	0,32	0,00	0,45	0,00	0,63	0,00	0,99	0,00	1,38
11	0,00	0,09	0,00	0,25	0,00	0,38	0,00	0,57	0,00	0,96	0,00	1,39
12	0,00	0,12	0,00	0,29	0,00	0,42	0,00	0,61	0,00	0,98	0,00	1,40
13	0,00	0,11	0,00	0,27	0,00	0,41	0,00	0,61	0,00	1,00	0,00	1,43
14	0,00	0,12	0,00	0,29	0,00	0,42	0,00	0,62	0,00	1,00	0,00	1,43
15	0,00	1,37	0,00	1,42	0,00	1,44	0,00	1,42	0,00	1,42	0,00	1,44
16	0,00	0,12	0,00	0,30	0,00	0,44	0,00	0,64	0,00	1,03	0,00	1,46
17	0,00	0,12	0,00	0,31	0,00	0,45	0,00	0,65	0,00	1,03	0,00	1,47
18	0,00	0,59	0,00	0,69	0,00	0,71	0,00	0,81	0,00	1,09	0,00	1,47
19	0,00	1,28	0,00	1,37	0,00	1,36	0,00	1,37	0,00	1,39	0,00	1,48
20	0,00	1,30	0,00	1,35	0,00	1,37	0,00	1,36	0,00	1,39	0,00	1,49
21	0,00	0,11	0,00	0,28	0,00	0,43	0,00	0,64	0,00	1,06	0,00	1,51
22	0,00	0,12	0,00	0,31	0,00	0,46	0,00	0,67	0,00	1,07	0,00	1,51
23	0,00	0,56	0,00	0,66	0,00	0,69	0,00	0,81	0,00	1,12	0,00	1,53
24	0,00	0,11	0,00	0,31	0,00	0,47	0,00	0,68	0,00	1,09	0,00	1,53
25	0,00	1,48	0,00	1,56	0,00	1,55	0,00	1,56	0,00	1,55	0,00	1,58
26	0,00	1,15	0,00	1,20	0,00	1,23	0,00	1,23	0,00	1,34	0,00	1,59
27	0,00	0,12	0,00	0,31	0,00	0,46	0,00	0,69	0,00	1,13	0,00	1,63
28	0,00	0,13	0,00	0,32	0,00	0,48	0,00	0,70	0,00	1,14	0,00	1,64
29	0,00	0,38	0,00	0,48	0,00	0,58	0,00	0,76	0,00	1,17	0,00	1,65
30	0,00	0,95	0,00	1,01	0,00	1,04	0,00	1,08	0,00	1,30	0,00	1,67
31	0,00	0,74	0,00	0,80	0,00	0,85	0,00	0,93	0,00	1,24	0,00	1,67
32	0,00	1,17	0,00	1,23	0,00	1,28	0,00	1,37	0,00	1,56	0,00	1,79
33	0,00	0,60	0,00	0,70	0,00	0,81	0,00	1,00	0,00	1,40	0,00	1,85
34	0,00	0,65	0,00	0,95	0,00	1,03	0,00	1,17	0,00	1,50	0,00	1,92
35	0,00	0,23	0,00	0,54	0,00	0,69	0,00	0,92	0,00	1,39	0,00	1,94
36	0,00	0,17	0,00	0,46	0,00	0,63	0,00	0,88	0,00	1,38	0,00	1,94
37	0,00	0,33	0,00	0,64	0,00	0,77	0,00	0,97	0,00	1,42	0,00	1,94
38	0,00	0,17	0,00	0,43	0,00	0,61	0,00	0,87	0,00	1,37	0,00	1,94
39	0,00	1,09	0,00	1,15	0,00	1,21	0,00	1,32	0,00	1,60	0,00	1,94
40	0,00	0,50	0,00	0,80	0,00	0,90	0,00	1,08	0,00	1,48	0,00	1,96
41	0,00	0,64	0,00	0,93	0,00	1,02	0,00	1,17	0,00	1,53	0,00	1,98

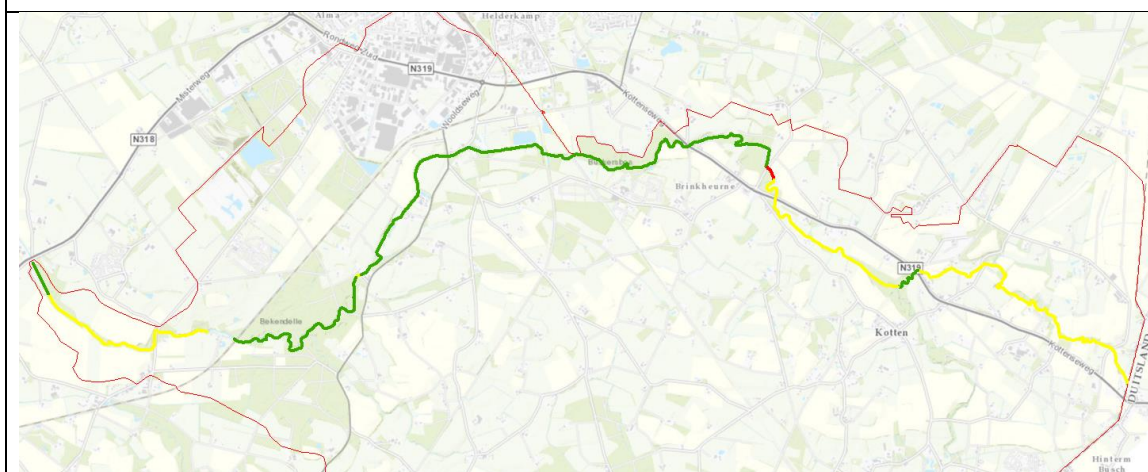
Bijlage 8. GEULTYPE



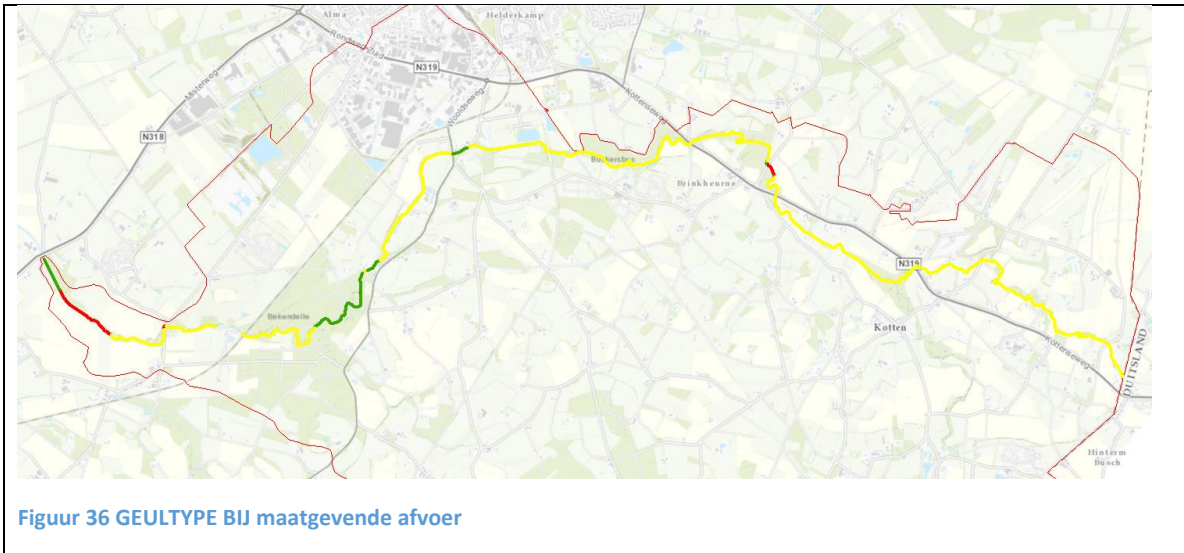
Figuur 33 GEULTYPE BIJ 10% maatgevende afvoer



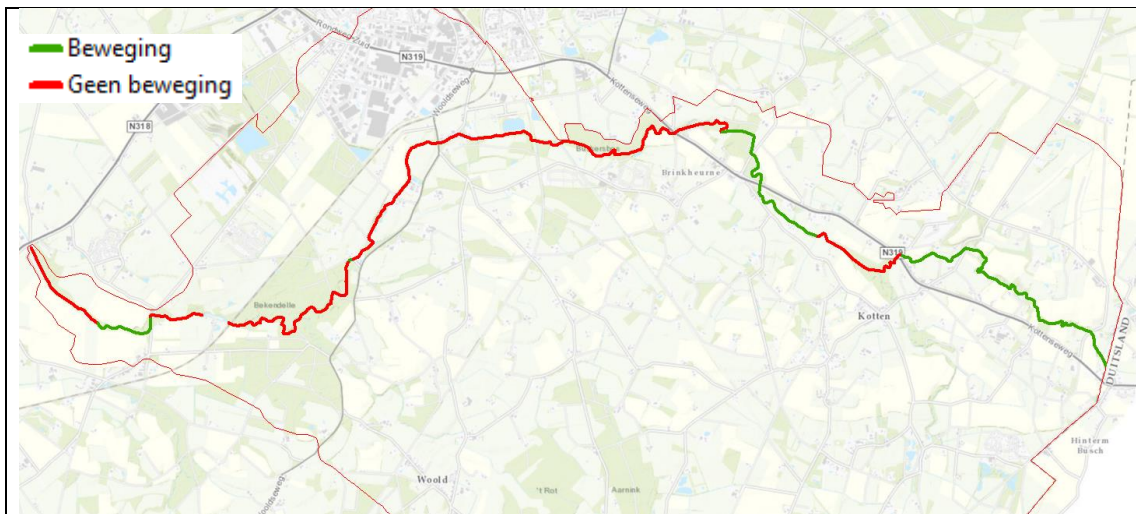
Figuur 34 GEULTYPE BIJ 20% maatgevende afvoer



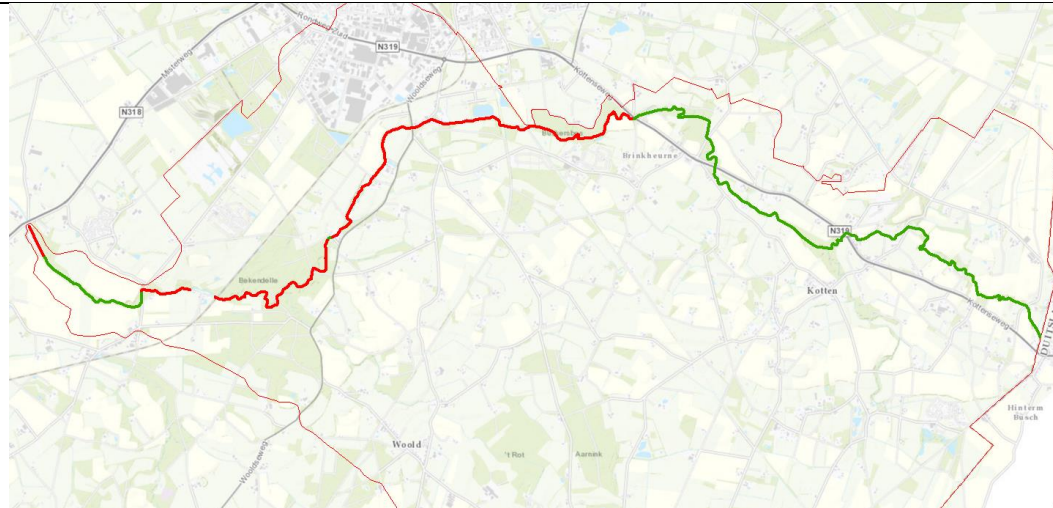
Figuur 35 GEULTYPE BIJ 50% maatgevende afvoer



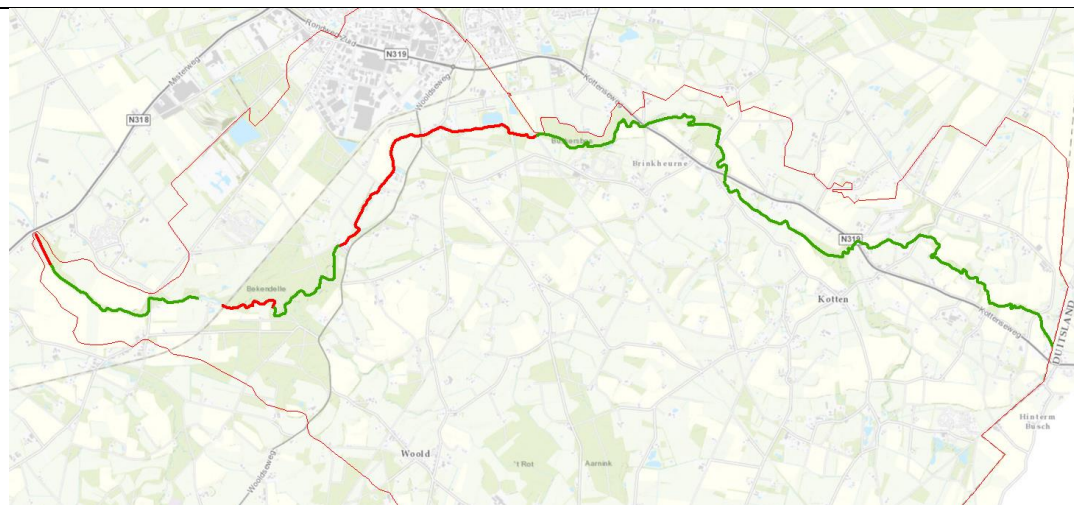
Bijlage 9. SEDIMENTTRANSPORT



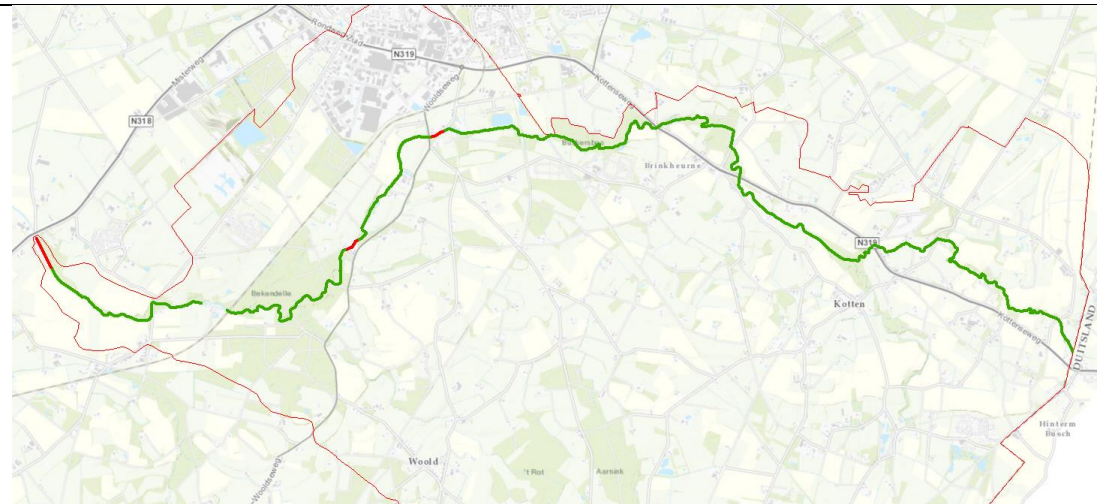
Figuur 37 SEDIMENTTRANSPORT BIJ 5% maatgevende afvoer



Figuur 38 SEDIMENTTRANSPORT BIJ 10% maatgevende afvoer

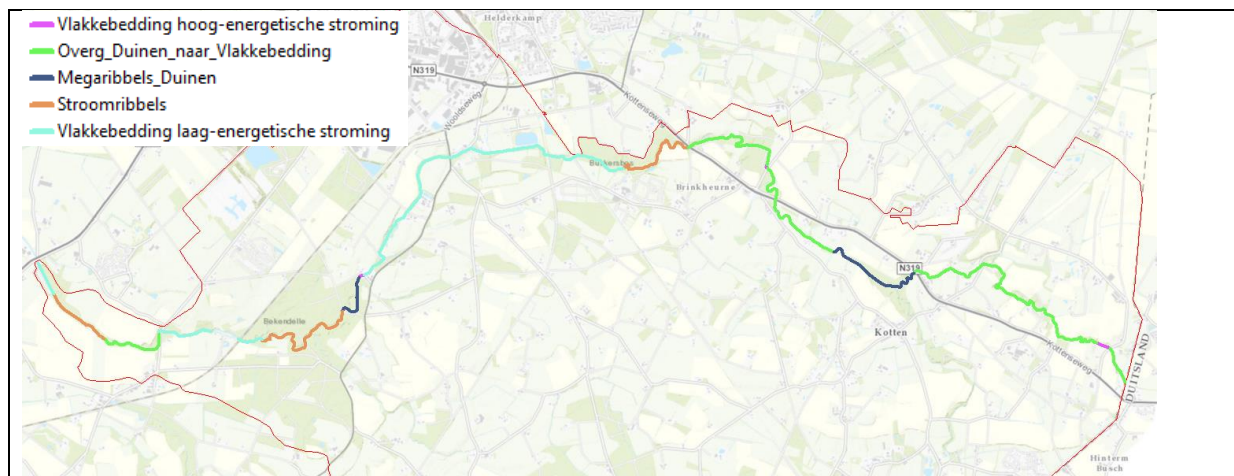


Figuur 39 SEDIMENTTRANSPORT BIJ 20% maatgevende afvoer

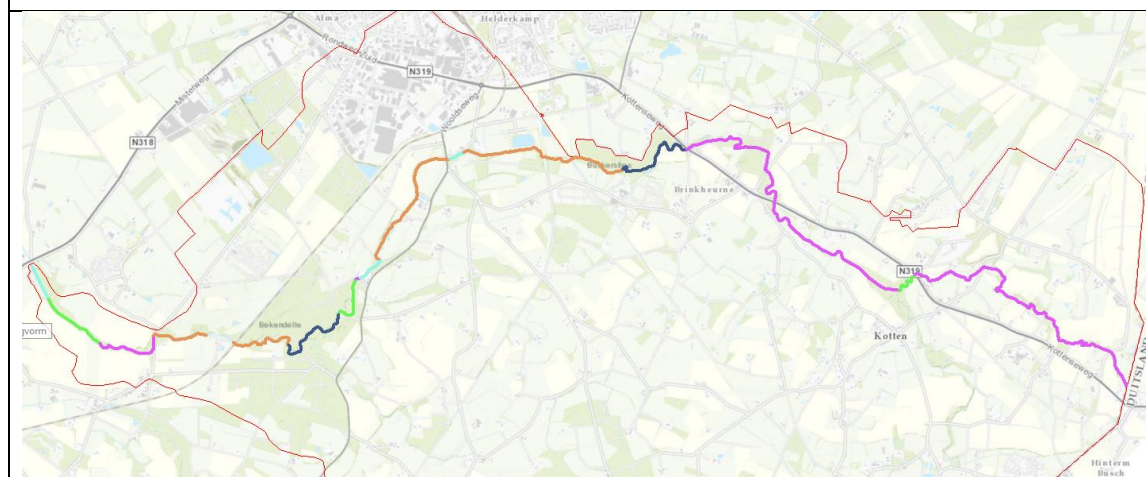


Figuur 40 SEDIMENTTRANSPORT BIJ 50% maatgevende afvoer

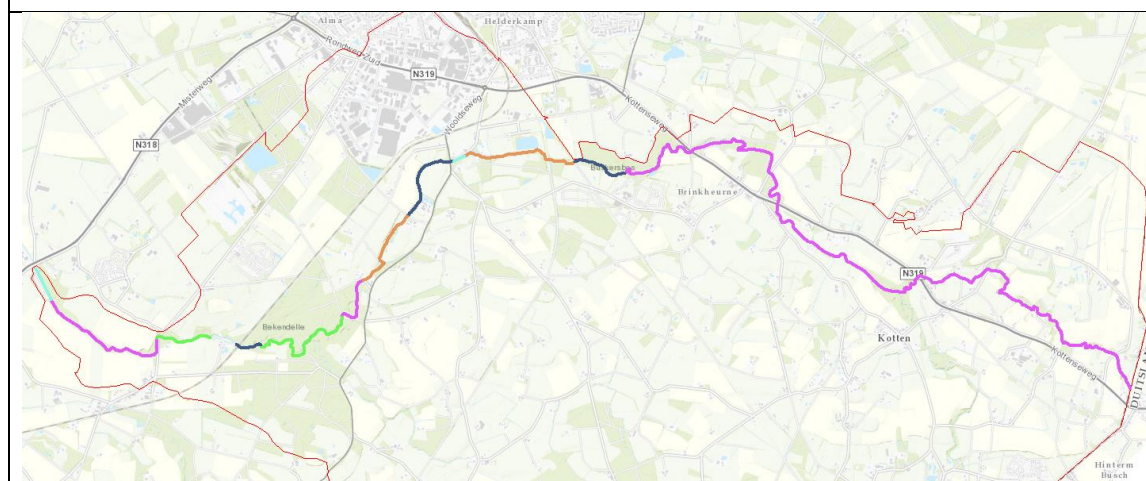
Bijlage 10. BEDDINGVORM



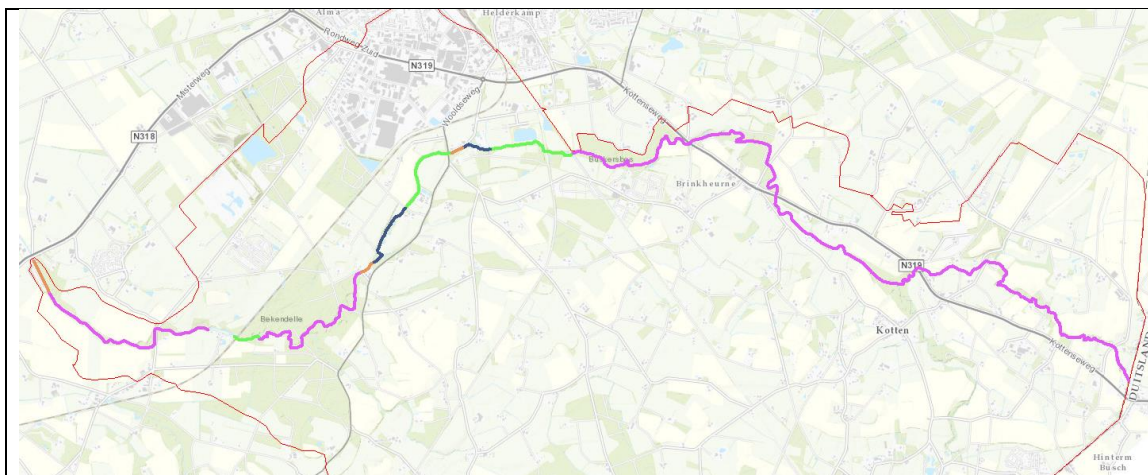
Figuur 41 BEDDINGVORM BIJ 1% maatgevende afvoer



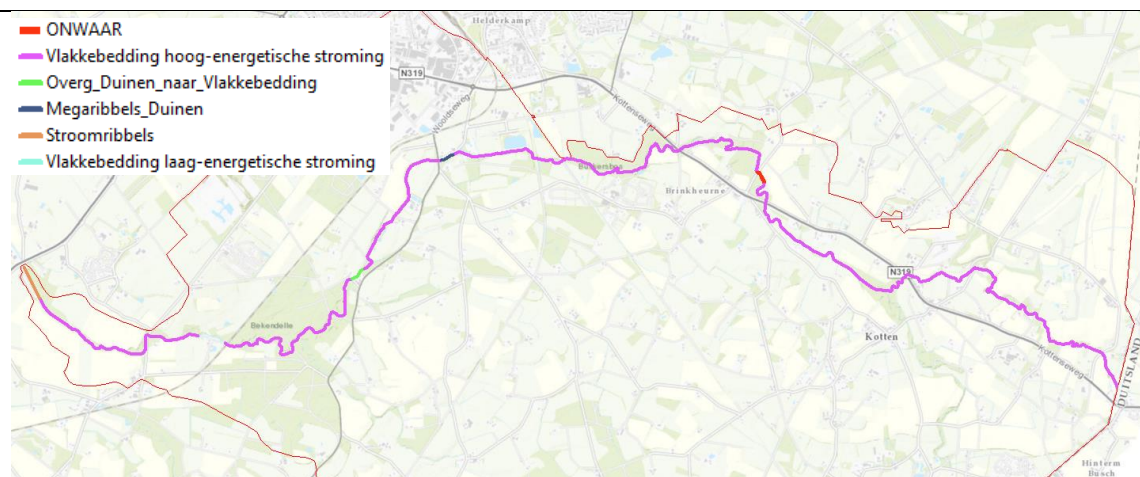
Figuur 42 BEDDINGVORM BIJ 5% maatgevende afvoer



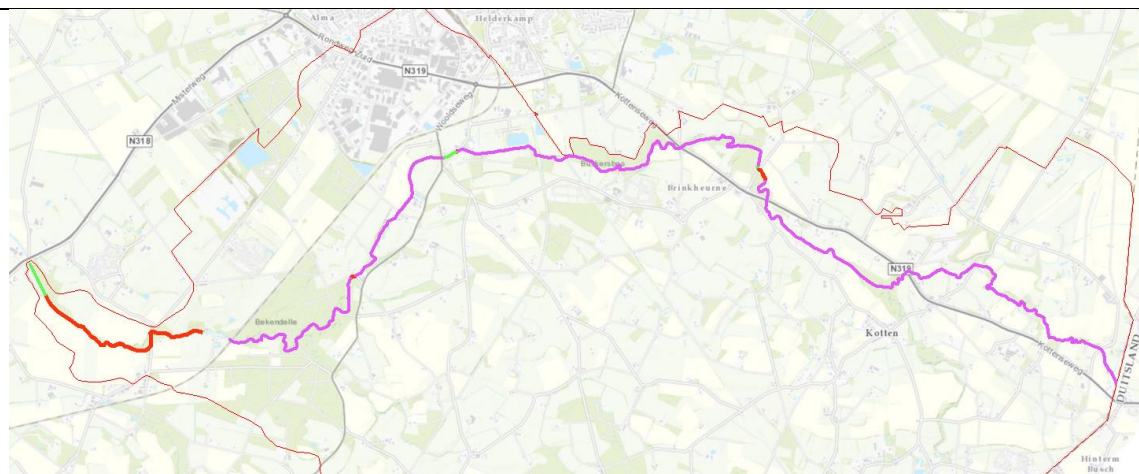
Figuur 43 BEDDINGVORM BIJ 10% maatgevende afvoer



Figuur 44 BEDDINGVORM BIJ 20% maatgevende afvoer

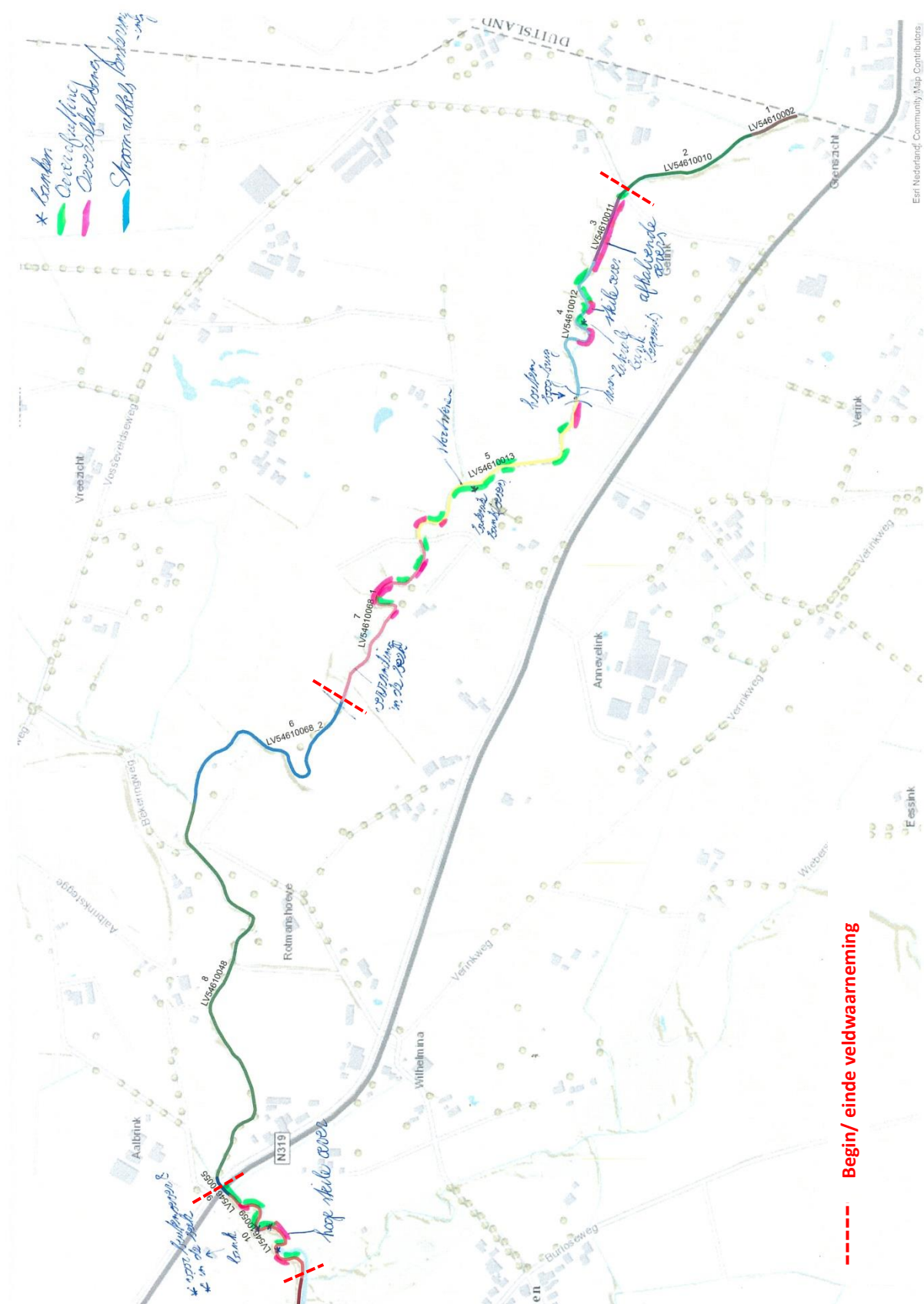


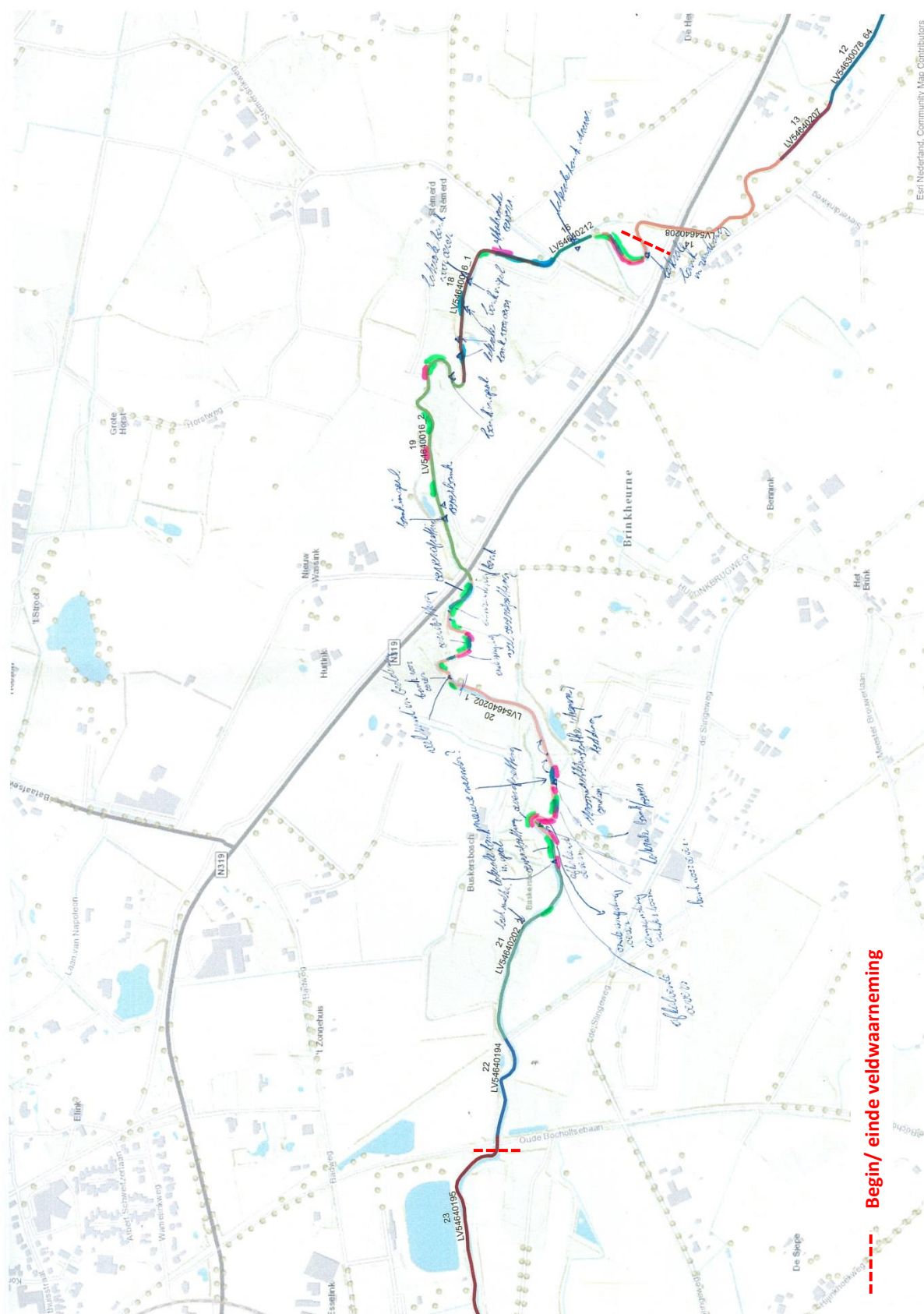
Figuur 45 BEDDINGVORM BIJ 50% maatgevende afvoer



Figuur 46 BEDDINGVORM BIJ maatgevende afvoer

Bijlage 11. WAARNEMINGEN





Bijlage 12. ZANDTONG BIJ STEMERDINKSWEG

@ Foto's schudproef

	De flessen met van links naar rechts, sedimentmonsters t.p.v.: 1. Op de zandtong 2. Achter de zandtong 3. Naast de zandtong 4. Voor de zandvang 5. In de zandvang De flessen zijn geschud, zodanig dat het sediment geheel los van de boven kwam (op de kop en zijdelings)
	Na 5 minuten is te zien dat in alle flessen al zand is gesedimenteerd. Echter meer dan direct na het schudden is het verschil in donkertint (=aanwezigheid van organisch materiaal) te zien. De flessen met sediment naast de zandtong (3) en in de zandvang (5) bevatten meer organisch materiaal
	Na 1 uur is alweer meer zand gesedimenteerd, evenals het organisch materiaal in flessen 3 en 5.

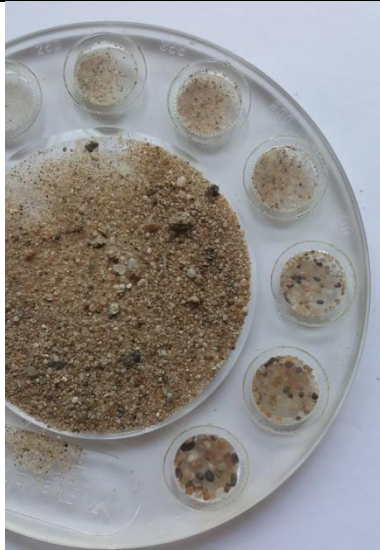


Na 2 uur is wel minder zand in suspensie (lichter), hetzij minimaal.



Na bijna 1 dag is nagenoeg alles gesedimenteerd op organisch materiaal in fles 3 na. Hetgeen te zien is dat het sediment op de zandtong (fles 1) het grofst is, zelfs t.o.v. voor de zandvang. Fles 3 vertoont een duidelijk gelaagdheid van fijn naar grof. Duidelijk is ook dat het sediment in de zandvang het fijnst is.

@ Foto's sedimentschijf



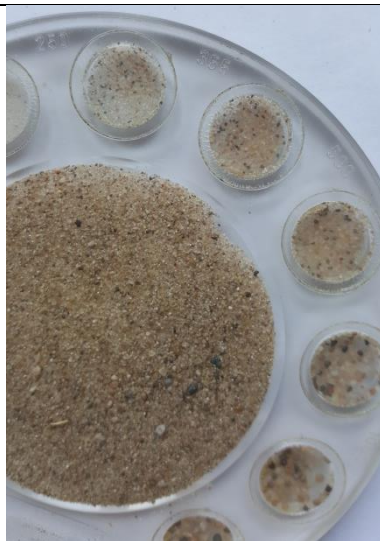
Figuur 47 Op de zandong,
korrelgrootte 250-710 µm



Figuur 48 Achter de zandong,
korrelgrootte 180-500 µm



Figuur 49 Naast de zandong,
korrelgrootte 180-355 µm

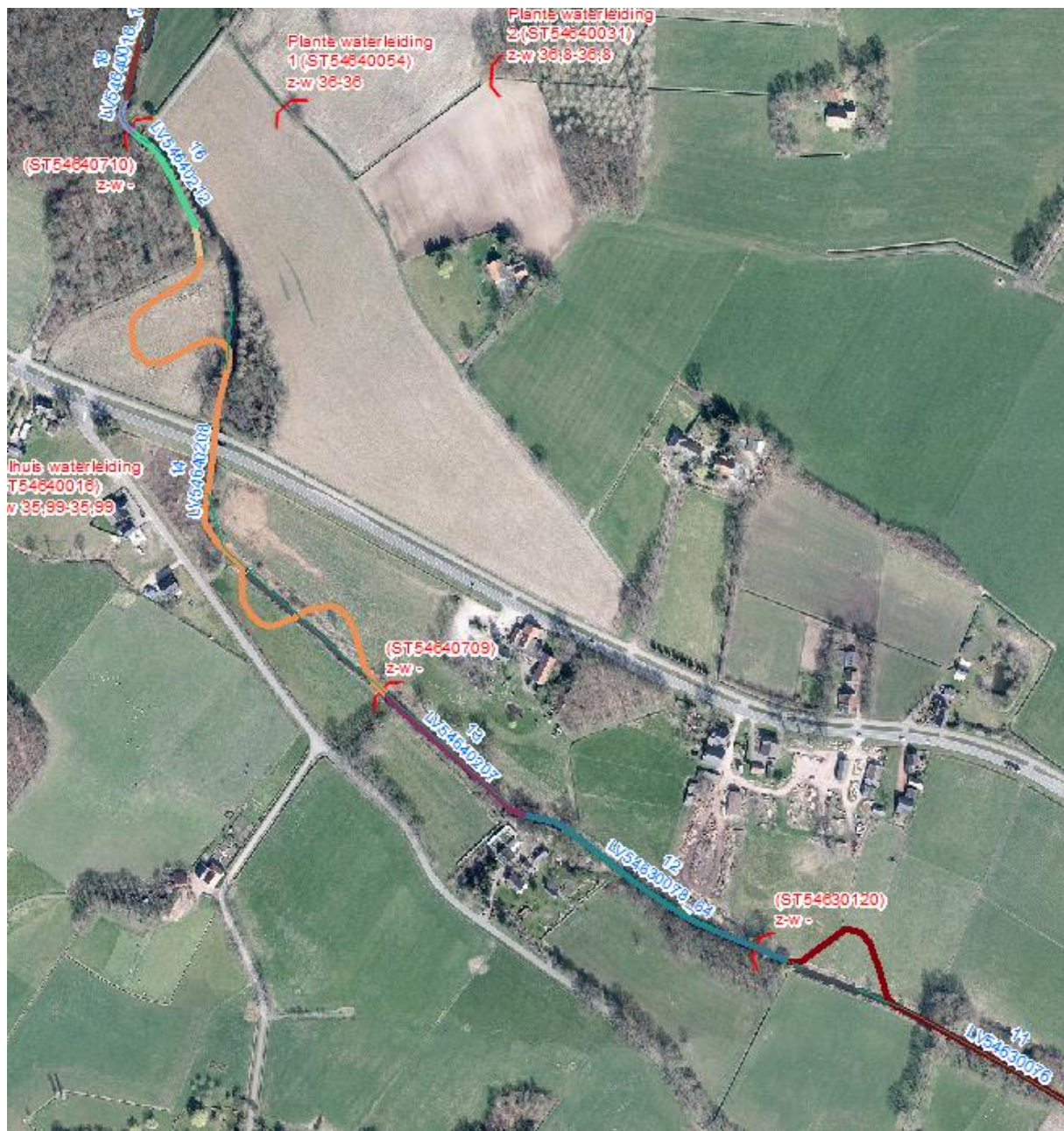


Figuur 50 Voor zandvang,
korrelgrootte 250-500 µm

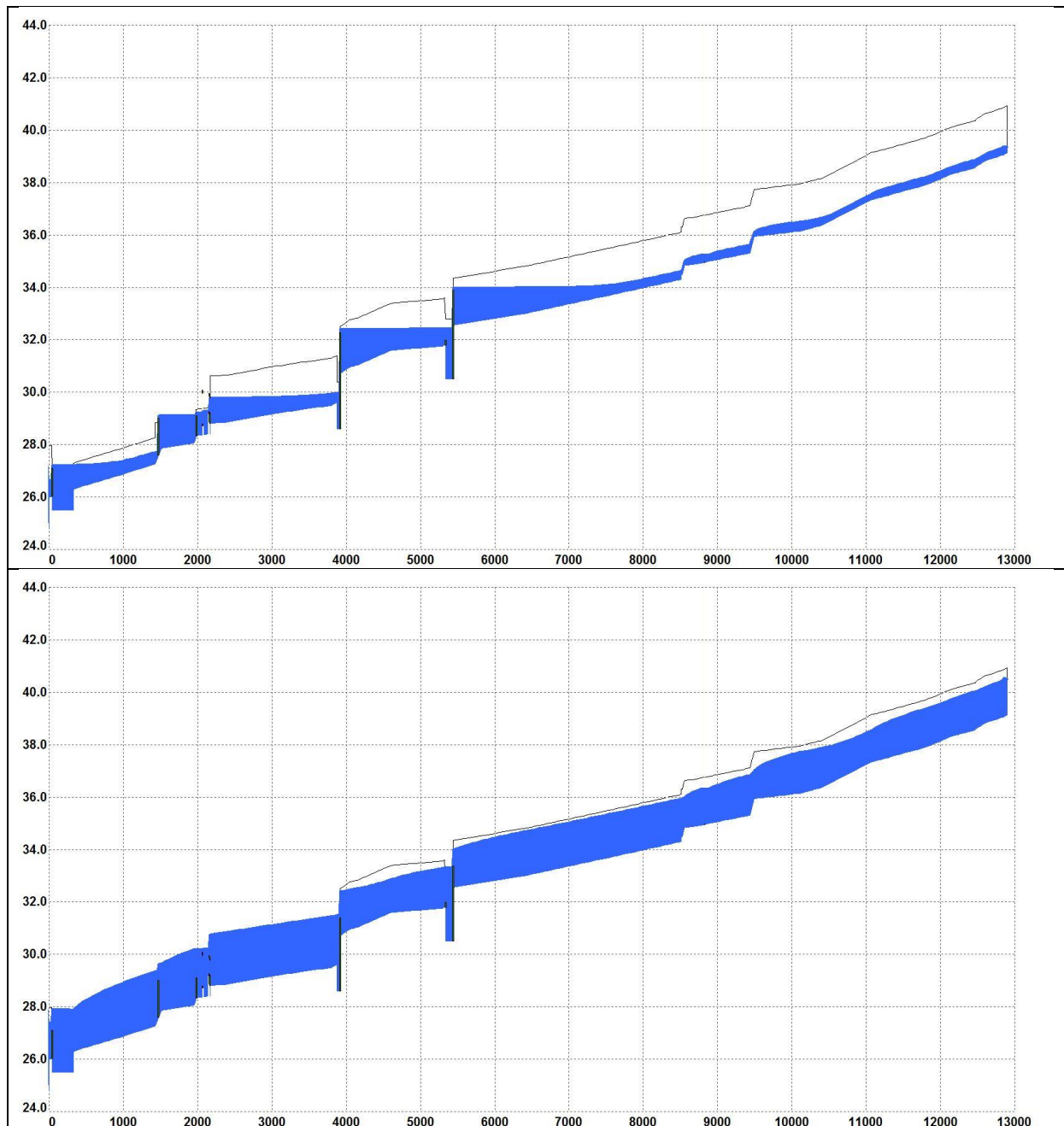


Figuur 51 In de zandvang,
korrelgrootte 180-355 µm

Bijlage 13. WIJZINGEN PROJECT “BURLOSEWEG”



Bijlage 14. SOBEK LENGTEPROFIELEN



Bijlage 15. LITERATUURLIJST

Dinoloket. (2018).

Klop, W. (2017). *MORFOLOGISCHE ONTWIKKELING VAN DE BOVEN SLINGE EN EEN DOORKIJK NAAR SEDIMENTBEHEER*. Arcadis.

Makaske, B.; Maas, G. (2015). *Handboek Geomorfologisch Beekherstel, Leidraad voor een stapsgewijze en integrale ontwerpaanpak*. Alterra, Wageningen UR.

Waterschap Rijn en IJssel. (2016). *Factsheet Boven Slinge*(traject bovenstrooms van zandvang Misterweg).