



Translatiegolven op de Twentekanalen

Scriptie
19-08-2019

Auteur:	L.W.J. de Wolde
Studentnummer:	s1857967
Opleiding:	BSc Civiele Techniek
Onderwijsinstelling:	Universiteit Twente
Externe Organisatie:	Rijkswaterstaat

Colofon

Titel	Translatiegolven op de Twentekanalen
Datum	19-08-2019
Versie	Definitief
Externe Organisatie	Rijkswaterstaat
Onderwijsinstelling	Universiteit Twente
Afbeelding voorblad	Ontstaan van een translatiegolf tijdens het schutten bij sluis Eefde. Screenshot van een YouTube video (JW aerial shots, 2016).

Contactgegevens

Auteur	Lars de Wolde
E-mail	larsdewolde2209@gmail.com
UT-mail	l.w.j.dewolde@student.utwente.nl
Telefoonnummer	+31 (0)623578534
Studentnummer	s1857967
Begeleider Rijkswaterstaat	Marc Kruis
Functie	Adviseur waterbouw
E-mail	marc.kruis@rws.nl
Telefoonnummer	+31 (0)615356849
Begeleider Universiteit Twente	Jord J. Warmink
Functie	Assistant Professor Hydraulic Engineering
E-mail	j.j.warmink@utwente.nl
Telefoonnummer (mobile)	+31 (0)6 18289543
Telefoonnummer	+31 (0)53 489 2831/3546

Voorwoord

Voor u ligt mijn scriptie genaamd "Translatiegolven op de Twentekanalen". Dit verslag beschrijft het onderzoek naar translatiegolven op de Twentekanalen en in hoeverre translatiegolven hinder kunnen opleveren tijdens het uitvoeren van werkzaamheden voor de opwaardering van de Twentekanalen. Dit onderzoek is uitgevoerd ter afronding van de Bachelor Civiele Techniek aan de Universiteit Twente. Het onderzoek is tot stand gekomen in samenspraak met het technisch management van Rijkswaterstaat project "Opwaardering Twentekanalen".

In het project "Opwaardering Twentekanalen" bleek dat Rijkswaterstaat een beperkt inzicht had in translatiegolven op de Twentekanalen. Daarnaast wilde het project meer weten over het mogelijke risico van translatiegolven op uitvoeringswerkzaamheden. Zelf wilde ik een technisch onderzoek uitvoeren. Deze opdracht bleek dus een schot in de roos. Toen deze opdracht op mijn pad kwam, had ik zelf nog een beperkte kennis van translatiegolven, wat de opdracht uitdagend maakte. Het was een onderzoek waarin ik veel geleerd heb en mij vol voor kon inzetten. Het onderzoek heeft mij veel geleerd over de manier van werken en het gaf mij een interessant "kijkje in de keuken" van Rijkswaterstaat en het project "Opwaardering Twentekanalen".

Tijdens mijn afstudeeronderzoek heeft Marc Kruis mij vanuit Rijkswaterstaat ontzettend geholpen bij het verzamelen van informatie, het aandragen van contacten voor specifieke kennis, het geven van feedback tijdens het onderzoek en het beantwoorden van mijn vragen. Hierbij wil ik hem graag bedanken voor alle hulp en de begeleiding tijdens de opdracht. Daarnaast wil ik Joyce Hoed bedanken voor haar hulp en bij wie ik ook altijd terecht kon voor vragen. Beide hartelijk dank voor deze kans om mijn eindopdracht bij Rijkswaterstaat uit te voeren en de begeleiding gedurende het onderzoek.

Vanuit de Universiteit wil ik graag mijn begeleider Jord Warmink bedanken voor de feedback die ervoor zorgde dat de scriptie in de juiste richting bleef gaan.

Het onderzoek was niet compleet geweest zonder een aantal mensen, die ik hiervoor dan ook wil bedanken. Ik wil daarvoor de volgende mensen bedanken: Michel Ruijter voor de informatie over translatiegolven en voor de geleende divers; Christiaan Jacobs voor de informatie over translatiegolven en de problemen op het Juliankanaal; Marc Hulshoff voor de informatie over translatiegolven en het contact met zowel de sluismeester van sluis Hengelo en Delden als het veldwerkbureau; Sluismeester Leen Verduijn voor de mogelijkheid om een dag bij sluis Delden de schuttingen te beschouwen; Ronald Bergijk van het veldwerkbureau voor het lenen van divers en tips voor het uitvoeren van veldmetingen.

Daarnaast wil ik alle collega's van het project "Opwaardering Twentekanalen" bedanken voor de leuke en leerzame tijd gedurende het onderzoek.

Ik wens u veel leesplezier,
Lars de Wolde

Emmer-Compascuum, 19-8-2019

Inhoudsopgave

Colofon	2
Voorwoord	3
Samenvatting.....	6
1. Inleiding	8
1.1 Achtergrond.....	8
1.2 Aanleiding en Probleemstelling.....	10
1.3 Onderzoeksdoel- en vragen	11
1.4 Leeswijzer	12
2. Onderzoeksmethode.....	13
2.1 Analytische berekening van translatiegolfhoogtes en stroomsnelheden.....	14
2.1.1 Representatieve nivelleerdebietsen en areaalgegevens	14
2.1.2 Methode analytische berekening voor eerste inschatting.....	14
2.2 Numerieke modellering van het verloop van translatiegolven.....	16
2.2.1 Combinaties van sluischuttingsen die translatiegolven versterken.....	16
2.2.2 Opstellen van het numerieke Sobek model	16
2.3 Inschatting van de betrouwbaarheid van model resultaten	20
2.3.1 Opzet waterniveau metingen.....	20
2.3.2 Waterstandsveranderingen veroorzaakt door translatiegolven.....	21
2.3.3 Nauwkeurigheid model vergeleken met de waterniveau metingen.....	21
2.4 Hinder door translatiegolven op het aanbrengen van kwelmaatregelen	22
2.4.1 Verplaatsingsafstand	24
3. Resultaten.....	25
3.1 Analytische berekening van translatiegolfhoogte en stroomsnelheden	25
3.2 Modellering van het verloop van translatiegolven door de Twentekanalen.....	26
3.3 Validatie van model resultaten	27
3.4 Hinder door translatiegolven op het aanbrengen van kwelmaatregelen	29
4. Discussie	32
5. Conclusie	33
6. Aanbevelingen	34
6.1 Advies aan Rijkswaterstaat.....	34
6.2 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek.....	34
Referenties	35
Bijlage A – Nivelleerdebietscurve van afschutting sluis Delden	36
Bijlage B – Kanaalpand modellen	37
Bijlage C – Waterniveau meting diver tussen sluis Hengelo en Delden.....	40

Bijlage D1 – Waterniveau meting dal a	41
Bijlage D2 – Waterniveau meting dal b	41
Bijlage D3 – Waterniveau meting dal c	42

Samenvatting

In dit rapport is het onderzoek toegelicht om inzicht te verkrijgen in translatiegolven op de Twentekanal en de mogelijke hinder die door translatiegolven kan ontstaan op het aanbrengen van kwelmaatregelen. Op de Twentekanal ontstaan door het schutten van sluizen waterverplaatsingen die door het kanaal heen lopen, translatiegolven genaamd.

Naar aanleiding van het project “Opwaardering Twentekanal” wil Rijkswaterstaat meer inzicht verkrijgen in translatiegolven op de Twentekanal. Het project omvat de verruiming van een groot deel van de Twentekanal, die in de vorige fase niet zijn verruimd, opdat de kanalen geschikt worden voor klasse Va-schepen. Daarnaast worden waar mogelijk ecologische verbindingen versterkt en wordt de waterkwaliteit verbeterd. De uitvoering van het project beslaat dus vele en meerdere typen werkzaamheden. Het is van belang dat het risico op hinder door translatiegolven tijdens de uitvoeringswerkzaamheden beperkt blijft. Daarnaast is het van belang dat het risico wordt beperkt, dat translatiegolven ervoor kunnen zorgen dat uitgevoerde werkzaamheden niet voldoen.

Er is weinig bekend over translatiegolven op de Twentekanal en dit zorgt ervoor dat het bepalen van het risico voor het project beperkt is. Het is onbekend hoe translatiegolven zich voortplanten, welke waterstandsverandering hierbij optreedt en welke stroomsnelheid in het kanaal ontstaat als gevolg van een translatiegolf. Daarnaast is niet bekend waar de waterstandsveranderingen en stroomsnelheden maximaal zijn en is het onduidelijk of translatiegolven door het schutten bij boven- en benedenstroomse sluizen elkaar kunnen beïnvloeden. Doordat deze parameters onbekend zijn is het onduidelijk of translatiegolven een risico opleveren tijdens het uitvoeren van werkzaamheden op de Twentekanal en op de uitgevoerde werkzaamheden.

Het doel van dit onderzoek is het verkrijgen van inzicht in translatiegolven op de Twentekanal, door het onderzoeken van de voortplanting van translatiegolven, de waterstandsveranderingen en stroomsnelheden die hierdoor ontstaan en de locatie waarop deze maximaal zijn. Ook is er bepaald of translatiegolven hinder kunnen veroorzaken tijdens de geplande werkzaamheden voor de opwaardering van de Twentekanal, met als focus het aanbrengen van kwelmaatregelen.

Het onderzoek is aangepakt door gebruik te maken van meerdere methodes. Om inzicht te verkrijgen in translatiegolven en er hierna dieper op in te gaan, is een volgorde van grof naar fijn aangehouden. Daarnaast zijn de resultaten gevalideerd en is het risico op hinder berekend. Na een literatuuronderzoek is een analytische berekening uitgevoerd die voor een eerste inschatting zorgt. Daarna is een Sobek model opgesteld dat gebruik maakt van de Saint-Venants vergelijkingen voor een nauwkeurige berekening. Deze modelresultaten zijn gevalideerd a.d.h.v. veldmetingen waarbij de waterstandsverandering door een translatiegolf is gemeten. Tot slot zijn berekeningen gemaakt die een indicatie geven van de hinder die ontstaat op het aanbrengen van kwelmaatregelen als gevolg van een translatiegolf.

De maximale translatiegolven op de Twentekanal ontstaan op het kanaalpand Hengelo-Delden als gevolg van schuttingen bij sluis Hengelo. Hier is de maximale translatiegolfhoogte 0,15 meter en de maximale stroomsnelheid 0,27 m/s. Er is gebleken dat translatiegolven over het kanaal nauwelijks uitdemping hebben, van sluis tot sluis verliezen translatiegolven ongeveer 0,03 meter in hoogte en 0,05 m/s aan snelheid. Verbredingen en versmallingen zoals zwaaikommen en brug(hoofden) zorgen wel voor een kleine vermindering van de translatiegolven per verbreding of versmalling, waardoor er op kanaalpanden met veel van deze objecten wel een significante uitdemping optreedt. Er ontstaan in de onderzochte combinaties geen scenario's waarbij meerdere schuttingen ervoor kunnen zorgen dat translatiegolven versterkt worden. Uit de validatie van modelresultaten a.d.h.v. veldmetingen blijkt dat ze elkaar bevestigen. Er zit een kleine afwijking van 2 à 3 minuten in de duur van de

translatiegolf en het tijdstip waarop de translatiegolf de diver zou moeten passeren, dit is relatief weinig. Voor het aanbrengen van kwelmaatregelen kunnen translatiegolven ervoor zorgen dat het mengsel van zand-bentoniet dat wordt aangebracht 55 meter meegevoerd kan worden. Dit gebeurt wanneer het mengsel ter hoogte van het kanaaloppervlak wordt ingelaten. Wordt dit gedaan op 0,5 meter van de bodem dan bedraagt de verplaatsingsafstand maximaal 7 meter.

Uit de resultaten blijkt dat de analytische berekening een goede indicatie geeft van de translatiegolfhoogte en de maximale stroomsnelheid. Dit wordt door de Sobek resultaten bevestigd en ook uit de veldmetingen blijkt dat de modelresultaten overeenkomen met de werkelijkheid. Geconcludeerd kan worden dat er een risico bestaat op uitgevoerde werkzaamheden door translatiegolven. Tijdens het aanbrengen van een mengsel van zand-bentoniet als kwelmaatregel, kan het mengsel worden meegevoerd door een translatiegolf. De afstand is dusdanig dat het kan leiden tot onhandige situaties, maar de verplaatsingsafstand is niet zo groot dat er grote problemen zullen ontstaan waar tijdens en na de uitvoering niet op ingesprongen kan worden. Om problemen voor het aanbrengen van kwelmaatregel te verkleinen is het advies om het aanbrengen van het mengsel zo dicht mogelijk bij de bodem te laten plaatsvinden. Omdat de bepaling van het risico bestaat uit een significant aantal aannames is het advies om, in het geval van een vervolgonderzoek, de verspreiding van korrels in de stromend water nader te onderzoeken. Hiermee wordt een nauwkeuriger resultaat verkregen. Echter, zal dit naar verwachting de verplaatsingsafstand alleen maar verminderen. Wanneer het dus alleen van belang is om een indicatie van het risico te verkrijgen en niet de exacte verplaatsingsafstand, is deze methode voldoende.

1. Inleiding

Bij het schutten van sluizen ontstaat er een waterverplaatsing. De verplaatsing van water ontstaat doordat er water vanuit het kanaal in de sluis stroomt, of doordat water uit de sluis naar het kanaal stroomt. De waterverplaatsing leidt tot een golf die zich vanaf de sluis verplaatst door het kanaal, een translatiegolf genaamd.

Voor Rijkswaterstaat zijn translatiegolven een bekend fenomeen. Er is echter niet op elk kanaal bekend in welke mate translatiegolven optreden. Voor het project “Opwaardering Twentekanalen” wil Rijkswaterstaat meer inzicht verkrijgen in translatiegolven op de Twentekanalen. Aansluitend hierop ziet het project translatiegolven ook als mogelijk risico. Dit risico zou zich kunnen uiten in de vorm van hinder tijdens het uitvoeren van werkzaamheden voor de opwaardering van de Twentekanalen. Het kan ook zijn dat de uitgevoerde werkzaamheden door translatiegolven niet voldoen.

In deze inleiding is de achtergrond van de Twentekanalen en het project Opwaardering Twentekanalen gegeven en zijn translatiegolven verder gedefinieerd. Hierna volgt de aanleiding van het onderzoek en de probleemstelling waarop het onderzoek gebaseerd is. Daaruit volgen de doelstelling en onderzoeksvragen. De laatste paragraaf bevat de leeswijzer voor dit rapport.

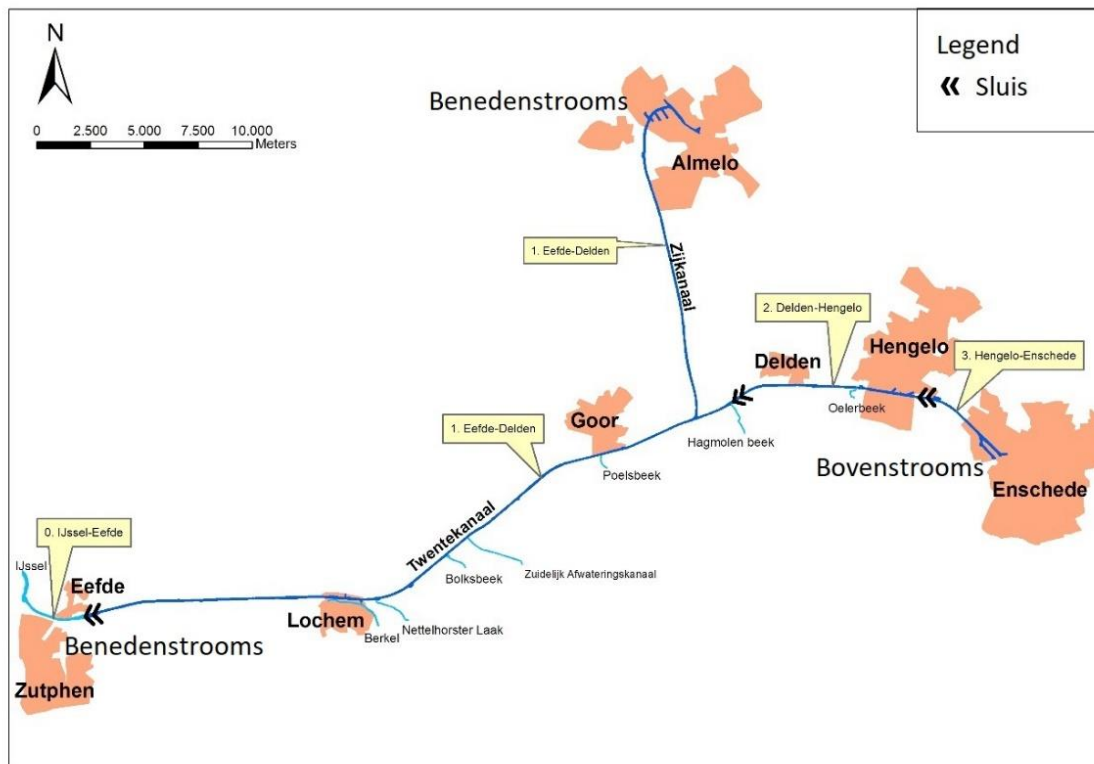
Voorafgaand aan de uitvoering van het onderzoek heeft een literatuurstudie plaatsgevonden. In de onderzoeksmethode is de relevante informatie uit de literatuurstudie toegelicht. Daarom bevindt zich in dit verslag geen aparte paragraaf met literatuurstudie of theoretisch kader.

Naast een literatuurstudie, is er ook gesproken met verschillende specialisten binnen Rijkswaterstaat. Zij zijn betrokken bij het onderzoek om de kwaliteit hiervan te bevorderen. Voorafgaand aan het onderzoek hielpen zij om een beeld te vormen van translatiegolven op de Twentekanalen. Tijdens het onderzoek zijn ook specifieke aspecten met de specialisten overlegd, in dit rapport staat dat bij de desbetreffende aspecten aangegeven.

1.1 Achtergrond

De Twentekanalen zijn aangelegd in 1936 om het transport van goederen en grondstoffen over water naar de steden in de regio Twente mogelijk te maken en vandaag de dag geldt deze functie nog steeds (Rijkswaterstaat, 2016). De Twentekanalen bestaan uit een 47 kilometer lang kanaal dat zich uitstrekt vanaf de IJssel bij Eefde helemaal naar Enschede en een 16 kilometer lange aftakking, die begint tussen Goor en Delden en loopt tot aan Almelo. In dit rapport is hiervoor de naam “zijtak” gebruikt. Een schematisering van de Twentekanalen is te zien in Figuur 1.

Het is een groot gebied met een hoge economische waarde voor de regio en met een groot potentieel. Om nog meer van de kanalen te profiteren, is Rijkswaterstaat o.a. gestart met het project “Opwaardering Twentekanalen”. In het project is een plan gemaakt om de gehele zijtak en het kanaal vanaf sluis Delden tot en met de havens van Enschede op te waarderen. Het hoofddoel van dit project omvat de verbreding en verdieping van het kanaal om het geschikt te maken voor klasse Va-schepen. Ook zorgt een ruimere vaarweg voor een vlottere en veiligere doorvoer. Daarnaast heeft het project verschillende nevendoelen die bestaat uit het uitvoeren van onderhoud en verbetering van sluizen, oevers en bruggen om de (ecologische) verbindingen alsmede de waterkwaliteit te verbeteren (Rijkswaterstaat, 2019). De klasse Va-schepen zijn grote schepen met meer diepgang zodat ze meer materialen kunnen vervoeren dan de huidige schepen op de Twentekanalen (Rijkswaterstaat WVL afdeling BNSV, 2017).



Figuur 1; Schematisering van de Twentekanaal (Visstandbeheercommissie, 2019).

Om een beter inzicht te verkrijgen in translatiegolven en de hinder die kan worden veroorzaakt, moet er eerst dieper worden ingegaan op de definitie van translatiegolven op de Twentekanaal. De translatiegolven op de Twentekanaal ontstaan bij de sluisen Hengelo, Delden en Eefde wanneer het waterniveau in de sluis wordt verhoogd, tijdens opschutten, of verlaagd, tijdens afschutten. Wanneer het waterniveau wordt verhoogd of verlaagd, stroomt er water van de ene kant van de sluisdeur naar de andere kant. Er is een verschil tussen translatiegolven als gevolg van opschutten en translatiegolven als gevolg van afschutten. In het geval van afschutten, stroomt water uit sluis op de benedenloop van het kanaal. Dit zorgt voor een tijdelijk hoger waterniveau dat zich verplaatst door het kanaal, een positieve translatiegolf genaamd. Tijdens opschutten gebeurt het tegenovergestelde. Er stroomt water uit de bovenloop van het kanaal. Dit zorgt voor een tijdelijk lager waterniveau wat zich verplaatst door het kanaal, een negatieve translatiegolf genaamd. De translatiegolven kunnen van een sluis naar een andere sluis stromen en niet verder, omdat altijd één van de twee sluisdeuren van een sluis gesloten is. Bij de sluisdeur weerkaatst de translatiegolf en loopt dan weer terug. Dit betekent dus dat een translatiegolf altijd in hetzelfde kanaalpand blijft. Een kanaalpand is een stuk kanaal van een sluis tot een andere sluis met overal hetzelfde waterniveau t.o.v. NAP. De Twentekanaal bestaan uit drie kanaalpanden: Kanaalpand Enschede-Hengelo, Hengelo-Delden en Delden-Eefde. De zijtak behoort tot het kanaalpand Delden-Eefde.

Translatiegolven kunnen zowel positief als negatief zijn. In het verslag wordt in beide gevallen gesproken van de translatiegolfhoogte. Bij een negatieve translatiegolf zal de translatiegolfhoogte daarom zijn aangeduid met een min teken voorafgaand aan de waarde.

1.2 Aanleiding en Probleemstelling

Rijkswaterstaat is bekend met translatiegolven op de Twentekanalen. Er is echter niet bekend in welke mate de translatiegolven voorkomen. Voor het project "Opwaardering Twentekanalen" wil Rijkswaterstaat meer inzicht verkrijgen in translatiegolven op de Twentekanalen. Aansluitend hierop is het ook mogelijk dat translatiegolven een risico vormen in de uitvoering van het project Opwaardering Twentekanalen. De uitvoering van het project Opwaardering Twentekanalen betekent een grote klus waarbij veel werkzaamheden plaatsvinden. Om dit zo goed mogelijk te laten verlopen, is het belangrijk dat risico's duidelijk in beeld zijn. Het risico door translatiegolven zou zich kunnen uiten in de vorm van hinder tijdens het uitvoeren van werkzaamheden voor de opwaardering van de Twentekanalen. Daarnaast kan er een risico door translatiegolven ontstaan op de uitgevoerde werkzaamheden, aangezien deze door translatiegolven mogelijk niet meer voldoen.

Het inzicht in translatiegolven op de Twentekanalen dat Rijkswaterstaat wil verkrijgen, betreft het volgende: hoe planten translatiegolven zich voort in de kanalen, welke stroomsnelheden en waterstandsveranderingen ontstaan hierbij en op welke locaties zijn deze maximaal. De voortplanting van de translatiegolven is onderzocht omdat het lange golven betreft. De verwachting vanuit Rijkswaterstaat is dat er weinig uitdamping optreedt bij de verplaatsing van de translatiegolf door het kanaal en dus over de gehele kanalen een translatiegolf zichtbaar zou moeten zijn.

Naast inzicht in translatiegolven die ontstaan door het schutten van één sluis, is er ook de mogelijkheid van translatiegolven die interfereren door combinaties van schuttingen van meerdere sluizen. Zoals aangegeven kunnen translatiegolven van sluis tot sluis lopen en dus kunnen er ook meerdere translatiegolven op het kanaal voorkomen. Of en hoe ze elkaar beïnvloeden is echter nog onbekend.

De mogelijke risico's door translatiegolven komen tot uiting tijdens uitvoeringswerkzaamheden. De uitvoeringswerkzaamheden bestaan onder andere uit het baggeren van het kanaal en aanbrengen van kwelmaatregelen op de bodem van het kanaal, het vervangen van damwanden en het realiseren van natuurvriendelijke oevers (NVO's). NVO's zijn oevers met een helling die het voor fauna mogelijk maakt om zelfstandig uit het kanaal te komen. De kwelmaatregel wordt gerealiseerd door het aanbrengen van een zand-bentoniet mengsel op de bodem. Vanaf een schip of ponton kan dit mengsel worden uitgespoten boven het kanaal of vanaf een bepaalde diepte in het kanaal, afhankelijk van de keuze van de aannemer. Bij damwand vervanging en de realisatie van natuuroevers worden oude damwandconstructies weggehaald. Daarna wordt er bij damwand vervanging een nieuwe damwandconstructie geplaatst. Bij het realiseren van NVO's wordt waar mogelijk of gewenst geen damwand geplaatst, maar wordt de oever ingericht als natuurvriendelijke oever. Bij damwand vervanging en de realisatie van NVO's gebeurt dit hoofdzakelijk vanaf pontons. Deze liggen dan verankerd aan de oever of staan op spudpalen.

Tijdens werkzaamheden is er nog een ander mogelijk risico. Schepen die de werkzaamheden passeren zullen zich moeten houden aan snelheidsrestricties. Om het schip bestuurbaar te houden moet het schip een bepaalde snelheid aanhouden t.o.v. de stroming in het kanaal. Het moment dat een schip met gelimiteerde snelheid vaart en er een translatiegolf langs komt, is er een mogelijkheid dat het schip een duw krijgt van de golf en hierdoor onbestuurbaar wordt. Dit kan leiden tot onwenselijke situaties.

Het mogelijke risico dat bestaat bij het uitvoeren van damwand vervanging en de realisatie van NVO's vanaf pontons is de waterstandsverandering die ontstaat bij het langskomen van een translatiegolf of door de langskrachten die op het schip werken. De langskrachten ontstaan doordat

het schip vastligt aan de oever, maar de translatiegolf het schip meeneemt. Wanneer de langskrachten te groot worden zou het schip van zijn plaats los kunnen komen.

Een mogelijk risico bij het aanbrengen van kwelmaatregelen, kan ontstaan door stroming in het kanaal. Het aanbrengen van kwelmaatregelen bestaat namelijk uit het uitspuiten van een zand-bentoniet mengsel. De stroming die onder een translatiegolf ontstaat, zou het mengsel echter mee kunnen voeren. Hierdoor is het mogelijk dat de kwelmaatregelen niet allemaal op de juiste locatie worden aangebracht of dat de aangebrachte laag te dun is.

Er is een beperkte tijd voor het onderzoeken van hinder. In overleg is er daarom voor gekozen om te focussen op één van de uitvoeringswerkzaamheden en deze verder te onderzoeken. Er is voor gekozen om de mogelijke hinder die ontstaat door translatiegolven op het aanbrengen van kwelmaatregelen verder te onderzoeken.

Probleemstelling

Rijkswaterstaat is niet bekend met de voorplanting van translatiegolven, welke waterstandsverandering en stroomsnelheid translatiegolven opleveren en waar en wanneer deze waterstandsveranderingen en stroomsnelheden maximaal zijn. Daarbij is het onduidelijk of translatiegolven door het schutten bij boven- en benedenstroomse sluizen elkaar beïnvloeden. Ook bestaat het mogelijke risico dat hinder ontstaat op de Twentekanalen tijdens uitvoeringswerkzaamheden en dat uitgevoerde werkzaamheden niet voldoen als gevolg van translatiegolven.

1.3 Onderzoeksdoel- en vragen

De doelstelling van dit onderzoek is: Het verkrijgen van inzicht in translatiegolven op de Twentekanalen, door het onderzoeken van de voortplanting van translatiegolven, de waterstandsveranderingen en stroomsnelheden die hierdoor ontstaan en de locatie(s) waarop deze maximaal zijn. Ook is er bepaald of translatiegolven hinder kunnen veroorzaken tijdens de geplande werkzaamheden voor de opwaardering van de Twentekanalen, met als focus het aanbrengen van kwelmaatregelen.

De hoofdvraag van dit onderzoek luidt als volgt:

In hoeverre kunnen translatiegolven optreden op de Twentekanalen en kunnen translatiegolven hinder veroorzaken tijdens de uitvoering van de geplande werkzaamheden voor de opwaardering van de Twentekanalen?

Om het doel te behalen en de hoofdvraag te beantwoorden, is het onderzoek opgesplitst in meerdere deelvragen. De deelvragen luiden als volgt:

1. Wat is een eerste inschatting van de maximale stroomsnelheden en hoogtes van de translatiegolven die worden veroorzaakt door het schutten van de sluizen?
 - a. Wat zijn representatieve nivelleerdebielten gebaseerd op historische data en areaalgegevens?

2. Hoe lopen de translatiegolven door het kanaal en zijn er combinaties van sluisschuttingen (scenario's) die translatiegolven versterken?
 - a. Welke scenario's kunnen de translatiegolven versterken?
 - b. Hoe wordt het Sobek model opgesteld en met welke (rand)voorwaarden moet rekening gehouden worden?
3. Hoe goed representeren de modelresultaten de waterniveau metingen?
 - a. Wat zijn de waterstandsveranderingen veroorzaakt door translatiegolven op basis van veldmetingen?
 - b. Hoe nauwkeurig zijn de gemodelleerde translatiegolfhoogtes vergeleken met de veldmetingen?
4. Hoe groot is de mogelijke hinder die door translatiegolven ontstaat op het aanbrengen van kwelmaatregelen?

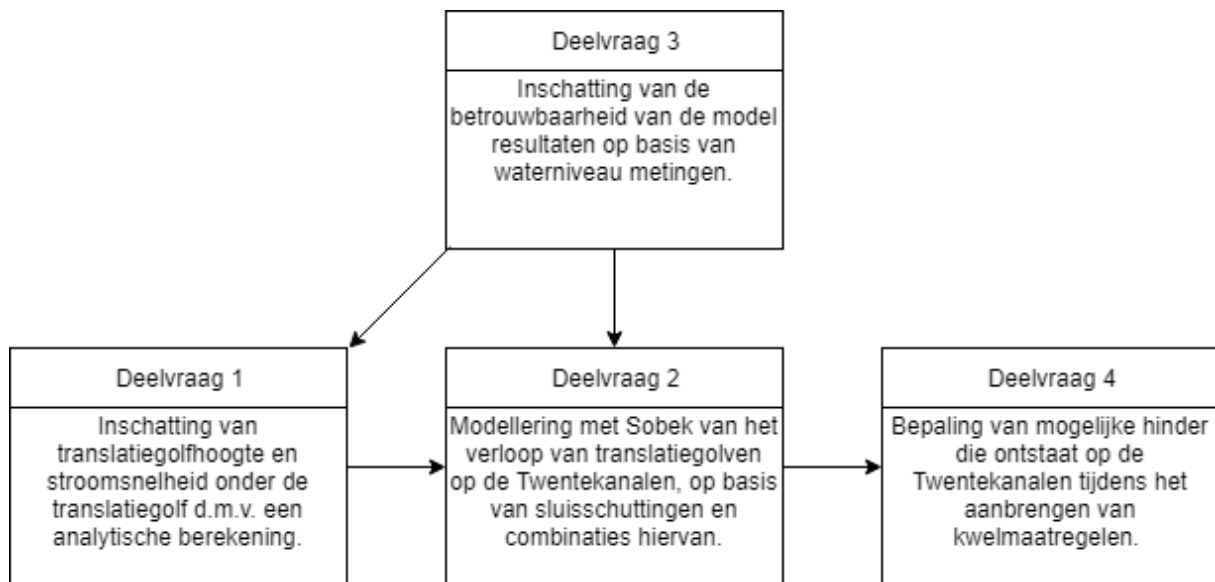
De doelstelling is gericht op zowel de hoofd- en zijtak van de Twentekanalen. Het onderzoeksgebied is het hoofdkanaal dat loopt van sluis Eefde tot aan de Auke Vleerstraat brug voor de haven van Enschede en de zijtak tot aan de haven van Almelo. In de haven van Almelo dempt de translatiegolf uit, evenals bij de haven van Enschede, waardoor onderzoek naar translatiegolven hier niet relevant is. Ook het "Voorpand" tussen de IJssel en sluis Eefde valt buiten het onderzoeksgebied.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 staat de onderzoeksmethode voor het beantwoorden van de verschillende deelvragen. Hoofdstuk 2 behandelt één deelvraag per paragraaf. In hoofdstuk 3 staan de resultaten van de verschillende onderzoeksmethodes. Hoofdstuk 4 bevat de discussie waarin punten van aandacht en kritiek zijn vermeld bij de gebruikte methode. Hoofdstuk 5 bevat de uiteindelijke conclusie van het onderzoek. Tot slot zijn in hoofdstuk 6 aanbevelingen aan de externe organisatie, Rijkswaterstaat, gedaan voor het gebruik van dit onderzoek in het project Opwaardering Twentekanalen.

2. Onderzoeksmethode

In dit hoofdstuk is de onderzoeksmethode per onderzoeksvraag beschreven (sectie 2.1-2.4). Om de gehele onderzoeksmethode duidelijk te omschrijven is deze geïllustreerd in Figuur 2. Hieronder staat in het kort uitgelegd wat elk onderdeel inhoudt. In de onderstaande paragrafen is per deelvraag een uitgebreide omschrijving van de onderzoeksmethode gegeven.



Figuur 2; Korte beschrijving van de onderzoeksmethode per deelvraag.

In de beschrijving van de onderzoeksmethode in Figuur 2 is in deelvraag 1 de analytische berekening vermeld. Voordat deze kan worden uitgevoerd moeten eerst de randvoorwaarden worden bepaald. Dit zijn de schutdebieten en areaalgegevens, oftewel kanaalprofielen. Daarna kan analytisch de maximale translatiegolfhoogte en stroomsnelheid onder de translatiegolf worden berekend. Dit wordt gedaan om een beeld te verkrijgen van de orde grootte van translatiegolven in de Twentekanal. Dit is inzichtelijker dan wanneer begonnen wordt met een numeriek model. Ook kunnen deze resultaten worden vergeleken met de modelresultaten van deelvraag 2 om mogelijke afwijkingen in resultaten te zien. Paragraaf 2.1 beschrijft de onderzoeksmethode van deelvraag 1.

Het verloop van de translatiegolven door de kanalen is ter indicatie via een analytische berekening uitgevoerd, maar een nauwkeurige berekening met een numeriek model geeft een completer beeld voor het gehele kanaal. Ook is het op deze manier mogelijk om meerdere sluisschuttings tegelijk te modelleren. Hierdoor kunnen mogelijke scenario's waarbij combinaties van sluisschuttings elkaar versterken worden onderzocht. De beschrijving van de onderzoeksmethode van deelvraag 2 staat in paragraaf 2.2. Deze paragraaf is opgedeeld in twee delen, ter beschrijving van deelvraag 2a en 2b.

Zoals in Figuur 2 is te zien, is er ook een inschatting van de fysieke betrouwbaarheid van de modelresultaten (analytisch en numeriek) uitgevoerd a.d.h.v. waterniveau metingen. In paragraaf 2.3 is de methode verder toegelicht. Ook hier is de paragraaf opgedeeld in de methode voor deelvraag 3a en 3b.

Deelvraag 4 beschrijft de mogelijke hinder die ontstaat tijdens het aanbrengen van kwelmaatregelen en de berekeningen die hiervoor zijn uitgevoerd. Deelvraag 4 staat in paragraaf 2.4 uitgelegd.

2.1 Analytische berekening van translatiegolfhoogtes en stroomsnelheden

In deze paragraaf is de onderzoeksmethode voor de beantwoording van deelvraag 1 toegelicht. Deelvraag 1a “Wat zijn representatieve nivelleerdebielen gebaseerd op historische data en areaalgegevens?” staat eerst toegelicht. Hierna volgt de methode voor het berekenen van de maximale stroomsnelheden en translatiegolfhoogtes veroorzaakt door het schutten van de sluisen.

2.1.1 Representatieve nivelleerdebielen en areaalgegevens

De randvoorwaarden voor dit onderzoek zijn de nivelleerdebielen behorend bij de op- of afschuttingen bij de drie sluisen Hengelo, Delden en Eefde en de areaalgegevens, oftewel het breedte- en diepteprofiel, van het kanaalpand.

Historische data voor de nivelleerdebielen komen voort uit de RINK-rapportages (Voortman et al., 2012) (Wilbrink et al., 2012) (Deltares, 2018). RINK staat voor risico-inventarisatie natte kunstwerken. In deze rapportages is o.a. de capaciteit van de sluisen berekend. Dit is voor meerdere nivelleerdebielen berekend. Hieruit blijkt dat er verschillen tussen nivelleerdebielen tijdens verschillende schuttingen ontstaan. Dit onderzoek is gericht op het verkrijgen van inzicht in translatiegolven en mogelijke hinder hierdoor, daarom zijn de maximale nivelleerdebielen als randvoorwaarde gekozen, omdat hierbij de hoogste translatiegolven met de hoogste stroomsnelheid bij worden verwacht. Uit de RINK-rapportages komen vijf schuttingen voort die relevant zijn voor het onderzoek: opschutten bij sluis Eefde, sluis Delden en sluis Hengelo en afschutten bij sluis Delden en sluis Hengelo.

Areaalgegevens zijn verkregen a.d.h.v. profielkaarten van Geoweb Twentekanalen (Rijkswaterstaat Oost-Nederland, 2019). Op de Twentekanalen komen drie verschillende profielen voor: een damwandprofiel waarbij de breedte van het kanaal 50 meter is, een damwandprofiel waarbij de breedte van het kanaal 60 meter is en een NVO-profiel waarbij de breedte van het kanaal 50 meter is, maar hierbij een helling in het kanaal loopt waardoor het natte oppervlak versmald wordt. Het bredere kanaalprofiel komt alleen voor in het hoofdkanaal vanaf sluis Eefde tot ongeveer halverwege het kanaalpand Eefde-Delden. Lokaal kunnen er afwijkingen in het kanaalprofiel voorkomen, dat is in deze methode verwaarloosd. De diepte van de Twentekanalen is niet overal gelijk. Rijkswaterstaat moet er echter op toezien dat in de toekomst de kanaaldiepte altijd minstens 3,8 meter bedraagt, zodat klasse Va schepen veilig op de Twentekanalen kunnen varen. De kanaaldiepte is het verschil tussen het wateroppervlak en de bodem van het kanaal. De verwachting is dat hoe minder diep de kanalen zijn, hoe hoger de translatiegolven. Dit volgt uit de formules in sectie 2.1.2. De aanname is daarom gemaakt om overal op de Twentekanalen uit te gaan van een kanaaldiepte van 3,8 meter.

2.1.2 Methode analytische berekening voor eerste inschatting

Om een indicatie te verkrijgen van hoe de translatiegolven zich gedragen in de Twentekanalen en naar welke orde grootte gekeken wordt, is de analytische berekening uitgevoerd. Deze analytische berekening is uitgevoerd door het gebruik van eenvoudige berekeningen die raken aan de werkelijkheid, hierbij zijn de belangrijkste parameters meegenomen. In deze berekeningen is de weerstand die een translatiegolf ondervindt weggelaten, omdat translatiegolven relatief weinig weerstand ondervinden. Ondanks dat translatiegolven t.o.v. andere golven relatief weinig weerstand ondervinden zijn deze berekeningen alleen representatief voor locaties binnen enkele honderden meters van een sluis, waar de weerstand nog verwaarloosbaar is. Zowel de golfhoogte die ontstaat door de translatiegolf als de stroomsnelheid onder de translatiegolf zijn bepaald. Eerst is de methode voor het berekenen van de translatiegolfhoogte gegeven. Hierna volgt de berekening van de stroomsnelheid onder de translatiegolf.

2.1.2.1 Translatiegolfhoogte

In de literatuur wordt bij lage translatiegolven per lopende golf onderstaande vergelijking gebruikt (Battjes & Labeur, 2014):

$$\delta Q = B * c * \delta h \quad (1)$$

Het hoogteverschil dat ontstaat door de translatiegolf kan worden bepaald door het omschrijven van deze vergelijking naar:

$$\delta h = \frac{\delta Q}{B * c} \quad (2)$$

Waarbij:

- δh = Golfhoogte [m].
- δQ = Nivelleerdebiet, positief gerekend in de looprichting van de golf [m^3/s].
- B = Breedte van het kanaal [m].
- c = De voortplantingssnelheid [m/s].

De voortplantingssnelheid wordt gegeven door:

$$c = \sqrt{\frac{g A_s}{B}} \quad (3)$$

In het geval van tweedimensionale stromen met rechthoekige doorsnede en met de aanname dat de breedte van het kanaal veel groter is dan de diepte, kan dit worden gereduceerd tot:

$$c = \sqrt{gd} \quad (4)$$

Waarbij:

- g = Zwaartekrachtsversnelling [$\frac{m}{s^2}$].
- d = Diepte van het kanaal [m]
- A_s = Natte oppervlak van het kanaal [m^2].

Voor deze analytische methode is gebruik gemaakt van het maximale nivelleerdebiet dat tijdens het schutten wordt geproduceerd, omdat dit o.b.v. de genoemde formules leidt tot de hoogste translatiegolf. In bijlage A is een grafiek van het nivelleerdebiet uitgezet tegen de tijd, van een afschutting bij sluis Delden. Uit het maximale nivelleerdebiet volgt de maximale waterstandsverandering vlak na een sluis. Elke sluis heeft een ander representatief nivelleerdebiet en ook het opschutten en afschutten bij dezelfde sluis gebeurt met een ander debiet. Er kan worden uitgegaan van een representatief nivelleerdebiet voor op- of afschutten bij een specifieke sluis, omdat onder alledaagse omstandigheden de nivelleerdebietsen bij elke schutting niet wezenlijk anders zijn. In de resultaten zijn de verschillende op- en afschuttingen besproken.

2.1.2.2 Stroomsnelheid onder de translatiegolf

Door de translatiegolf wordt naast een verhoging van de waterstand ook een stroming onder het wateroppervlak gecreëerd. De loopsnelheid van de translatiegolf aan het oppervlak is echter niet hetzelfde als de stroomsnelheid onder de translatiegolf.

De stroomsnelheid kan volgens de literatuur worden bepaald door middel van onderstaande vergelijking (Battjes & Labeur, 2014):

$$\delta U = \frac{\delta h}{d} * c \quad (5)$$

Waarbij:

- δU = De stroomsnelheid onder de golf [m/s].
- δh = Door de golf veroorzaakte waterstandsverandering [m].
- d = Diepte van het kanaal [m].
- c = De voortplantingssnelheid [m/s].

De waarde van c is afhankelijk van het kanaalprofiel dat wordt gebruikt. Formule (3) is de algemene formule voor de voortplantingssnelheid, maar zoals aangegeven kan in kanalen formule (4) worden gebruikt, mits voldaan aan de voorwaarde van een rechthoekige doorsnede.

Ook voor deze methode geldt dat van het maximale nivelleerdebiet gebruik is gemaakt, omdat deze naar verwachting leidt tot de grootste waterstandsverandering en dus tot de hoogste stroomsnelheid. Uit de waterstandsverandering berekend met formule 2 volgt de stroomsnelheid onder de translatiegolf. Dit betekent dat bij een negatieve waterstandsverandering, de stroomsnelheid ook negatief is. Een negatief debiet of stroomsnelheid betekenen een negatieve translatiegolf. Een negatieve translatiegolf beweegt zich altijd stroomopwaarts voort. Bij een positief debiet of stroomsnelheid ontstaat een positieve translatiegolf, deze beweegt altijd stroomafwaarts. Elke sluis heeft zoals gezegd een ander representatief nivelleerdebiet, wat ook geldt voor het opschutten en afschutten bij dezelfde sluis. In de resultaten is voor alle verschillende situaties de maximale stroomsnelheid gegeven.

2.2 Numerieke modellering van het verloop van translatiegolven

In deze paragraaf is de onderzoeksmethode voor de beantwoording van deelvraag 2 toegelicht. Eerst is deelvraag 2a (Sectie 2.2.1) besproken waarin verschillende combinaties van sluischuttingen zijn beschouwd. Hierna is deelvraag 2b (Sectie 2.2.2) besproken waarbij het Sobek model is uitgelegd en is vermeld welke uitkomsten het model kan leveren.

2.2.1 Combinaties van sluischuttingen die translatiegolven versterken.

Op de Twentekanalen is het mogelijk dat op één kanaalpand meerdere translatiegolven voorkomen. Dit is mogelijk doordat alle twee de sluisen die de grens van een kanaalpand vormen gesloten worden, of doordat een translatiegolf weerkaatst op de sluisdeur en weer terugloopt door het kanaalpand. Deze weerkaatsing is alleen in de numerieke modellering van het verloop van translatiegolven in de Twentekanalen meegenomen en niet in de analytische benadering. Dit is mogelijk in het kanaalpand Delden-Eefde, waar de zijtak ook onderdeel van is. De zijtak is hier namelijk verbonden met het hoofdkanaal en heeft ook hetzelfde waterniveau als het hoofdkanaal. Ook is het mogelijk dat in het kanaalpand Hengelo-Delden meerdere translatiegolven voorkomen. In het kanaalpand Enschede-Hengelo zorgt alleen sluis Hengelo voor schuttingen en dus kan maar aan een kant een translatiegolf ontstaan. Deze translatiegolven lopen in de haven van Enschede waar het kanaalprofiel dermate verbreedt dat de translatiegolf uitdempt. Het is daarom aannemelijk dat van terugkaatsing weinig sprake is.

2.2.2 Opstellen van het numerieke Sobek model

In deze sectie is deelvraag 2b uitgewerkt. Hierin is Sobek beschreven, evenals de benodigde randvoorwaarden, hoe het model is opgesteld en de beschrijving van de modellen van de verschillende kanaalpanden.

2.2.2.1 Beschrijving van het numerieke Sobek model en benodigde randvoorwaarden

Voor het onderzoeken van het verloop van de translatiegolven door de Twentekanalen zijn verschillende mogelijkheden. Berekeningen voor het verloop van translatiegolven maken gebruik van de Saint-Venants vergelijkingen. Deze vergelijkingen gelden namelijk in relatief ondiep water t.o.v. de breedte in een waterloop. In dit onderzoek is ervoor gekozen om dit uit te voeren door middel van het opstellen van een model in het programma Sobek 3. Het programma Sobek 3, hierna genoemd Sobek, is een programma voor de simulatie van waterbewegingen in 1-dimensionaal geschematiseerde open waterlopen (Helpdesk Water, 2019). De versie van Sobek die gebruikt is, is het 1D-flow model. De Saint-Venants vergelijkingen van het 1D-flow zijn iets versimpeld. In de Sobek Handleiding staat een exacte beschrijving van deze vergelijkingen (Deltares, 2015).

Voor het modelleren van de translatiegolven door de Twentekanalen zijn meerdere gegevens nodig. De nivelleerdebielen van de sluizen Hengelo, Delden en Eefde voor zowel opschutten als afschutten zijn nodig. Ook zijn hydraulische randvoorwaarden bestaande uit kanaalafmetingen, ruwheid-coëfficiënten van bodem en oevers en de waterdiepte in het kanaal vereist.

De historische data voor de nivelleerdebielen volgen uit de RINK-rapportages die ook zijn beschreven in paragraaf 2.1.1 voor de analytische berekening. Voor een exactere representatie van een sluischutting is niet alleen meer gekeken naar het maximale nivelleerdebiet, maar naar de nivelleerdebielcurve. Het schutten is een stapsgewijs proces waarbij de sluisopeningen meerdere keren kunnen worden vergroot over de tijd, wat betekent dat ook het debiet verandert over de tijd. Door middel van het invullen van enkele punten van het nivelleerdebiet zorgt Sobek voor een lineaire interpolatie van het nivelleerdebiet als randvoorwaarde. In Bijlage A is de nivelleerdebielcurve van een volledige sluischutting bij sluis Delden geïllustreerd. Bij deze sluis wordt de sluisopeningen snel verhoogt tot de maximale opening waarna de sluis langzaam nivelleert. Het debiet neemt daarna af doordat het verval terugloopt.

De kanaalafmetingen zijn in de breedte en diepte per kanaalpand gelijk of zorgen niet voor significante verschillen in het verloop van translatiegolven. Deze kanaalafmetingen zijn uit kanaalprofiel-kaarten gehaald. Belangrijk voor het verloop van translatiegolven zijn versmallingen of verbredingen in het kanaal die abrupt beginnen of eindigen waardoor een deel van de translatiegolf niet meer mee loopt, maar wordt teruggekaatst. Verbreding is vaak het geval bij zwaaikommen of bij een splitsing in het kanaal en versmalling op plekken waar een deel van een brughoofd in het kanaal staat. Deze profielen zijn meegenomen door gebruik te maken van Geoweb kaarten van de Twentekanalen (Rijkswaterstaat Oost-Nederland, 2019).

Ruwheidscoëfficiënten gelden voor bodem en NVO's. Damwanden staan verticaal in het kanaal en zijn aangenomen als gladde objecten zonder weerstanden. Ruwheidscoëfficiënten die zijn gebruikt staan in sectie 2.2.2.1 "Opstellen van het Sobek model".

De waterhoogte t.o.v. N.A.P. van de Twentekanalen is door het hoogteverschil in de regio per kanaalpand verschillend. De diepte van het kanaal is afhankelijk van het waterniveau t.o.v. het bodemniveau. In de huidige situatie zijn de Twentekanalen niet even diep, maar na uitvoering van de plannen in het project Twentekanalen is over de gehele Twentekanalen een waterdiepte van ten minste 3,8 meter gerealiseerd. Om dit onderzoek ook relevant te laten zijn in de toekomst en niet alleen voor de korte periode tijdens de uitvoeringswerkzaamheden is ervoor gekozen om deze waterdiepte aan te houden.

De Twentekanalen die binnen het studiegebied vallen zijn gemodelleerd. In een kanaalpand is het mogelijk dat er van één kant translatiegolven ontstaan of vanaf twee kanten, wanneer aan beide randen van het kanaalpand een sluis staat. Op een kanaalpand is het dus mogelijk om zowel een

negatieve als positieve translatiegolf te beschouwen. Daarnaast is het ook mogelijk dat een combinatie van sluisschuttingen, waarbij een translatiegolf mogelijk versterkt wordt, op een kanaalpand voorkomt.

Het resultaat van de modellering is de maximum translatiegolfhoogte en stroomsnelheid onder de translatiegolf per scenario.

2.2.2.2 Opstellen van het Sobek model

Sobek en de benodigde randvoorwaarden zijn hierboven beschreven. Hier is toegelicht hoe het Sobek model van de Twentekanalen is gemaakt, welke waarden voor de randvoorwaardes zijn ingevuld en welke versmallingen en verbredingen in het kanaalprofiel zijn meegenomen.

De Twentekanalen bestaan uit drie kanaalpanden. De verschillende kanaalpanden hebben ook een verschillend waterniveau t.o.v. NAP. Translatiegolven in een kanaalpand kunnen translatiegolven in andere kanaalpanden niet beïnvloeden (zie ook paragraaf 1.1). Er is daarom voor gekozen om de kanaalpanden afzonderlijk te modelleren. Dit betekent dat drie modellen gemaakt zijn:

- Kanaalpand model "Enschede- sluis Hengelo" (+25 meter NAP)
- Kanaalpand model "Sluis Hengelo- sluis Delden" (+16 meter NAP)
- Kanaalpand model "Sluis Delden- sluis Eefde, inclusief de zijtak" (+10 meter NAP)

Uit de Sobek user manual (Deltares, 2015) volgt dat er een rekenraster moet worden ingevuld. Deze punten worden evenredig verspreid over het kanaalpand. Op elk punt rekent Sobek de output-parameters door. Hoe kleiner de punten in dit rekenraster, hoe nauwkeuriger de resultaten voor het gehele kanaal. Er is gekozen voor een rasterprofiel met om de 50 meter een rasterpunt. Dit is voor alle drie de modellen van de kanaalpanden gelijk genomen.

Voor de ruwheid in deze kanaalpanden is geen exacte waarde beschikbaar. Door middel van het uitvoeren van modeltesten waarbij de modellen gerund werden met verschillende ruwheidscoëfficiënten is gebleken dat de ruwheid weinig invloed heeft op de hoogte en snelheid van translatiegolven. Daarom is besloten deze waarde aan te nemen op een Chezy-waarde van 50. Dit is de gemiddelde waarde van de ruwheid van de bodem in kanaalpanden, die tussen een Chezy-waarde van 40 en 60 ligt. Deze beslissing is genomen na overleg met adviseur waterbouw Michel Ruijter van Rijkswaterstaat. Voor elk kanaalpand model geldt de Chezy waarde van 50.

Verdere randvoorwaarde is de begin- en eindrand. Bij een schutting van een sluis ontstaat een bepaald nivelleerdebiet. Dit is de beginrand van een model. Het nivelleerdebiet over de tijd is als $Q(t)$ -grafiek ingevuld. Bij het scenario van een enkele sluisschutting heeft de eindrand een vaste waarde. De randvoorwaarde voor de eindrand is $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$. Bij het scenario dat een schutting van beide sluizen optreedt is voor zowel de begin- als eindrand het nivelleerdebiet als $Q(t)$ -grafiek ingevuld.

Het kanaalpand model "Enschede - sluis Hengelo" is hieronder beschreven, de kanaalpand modellen "Sluis Hengelo- sluis Delden" en "Sluis Delden- sluis Eefde, inclusief de zijtak" zijn beschreven in Bijlage B – Kanaalpand modellen.

In Sobek ziet het kanaalpand "Enschede – sluis Hengelo" er als volgt uit (Figuur 3):

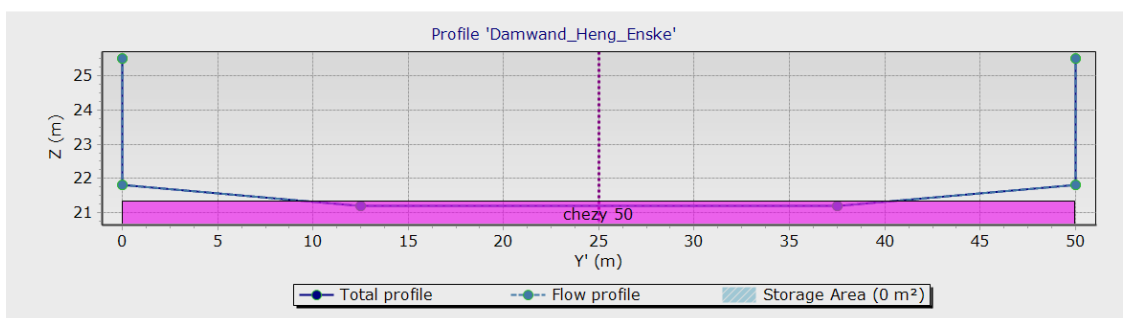


Figuur 3; Sobek model Enschede - sluis Hengelo.

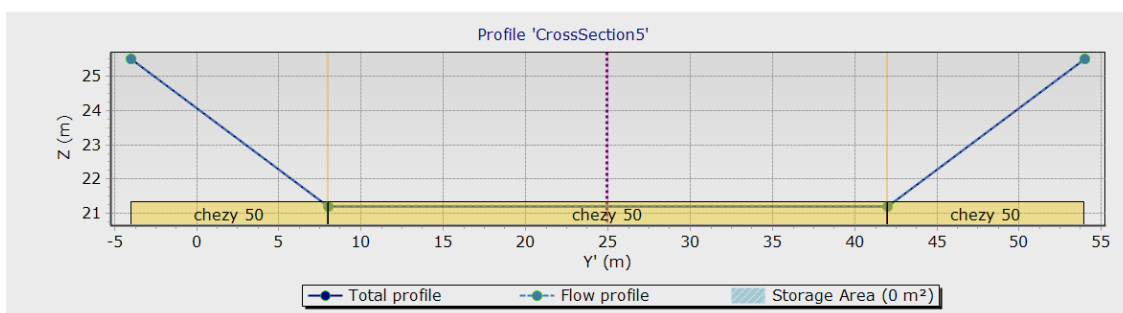
Hierbij zijn twee algemene dwarsprofielen gebruikt. Dit zijn het dwarsprofiel voor damwanden (breedte: 50 meter) en het dwarsprofiel voor NVO's (breedte 60 meter), weergegeven in respectievelijk Figuur 4 en Figuur 5. In Figuur 3 is aangegeven waar het NVO profiel zich bevindt. Op de locaties waar niets is aangegeven geldt dat hier het damwand dwarsprofiel is gebruikt. Deze dwarsprofielen zijn bepaald aan de hand van de eerdergenoemde dwarsprofielkaarten. Verder zijn de volgende verbredingen of versmallingen in het profiel toegevoegd aan het model:

- "Zwaaiikom" Kristalbad (verbreding, breedte: 180 meter)
- Lonnekerbrug (geleidelijke vernauwing, breedte: 30 meter)
- Verbreding die de haven van Enschede simuleert (breedte: 110 meter, einde studiegebied)

De locatie van deze profielen staat aangegeven in Figuur 3. Het zijn allen damwand profielen zoals in Figuur 4, maar dan breder of smaller. De dwarsprofielen hiervan zijn daarom verder niet weergegeven in het rapport.



Figuur 4; Damwandprofiel Enschede – sluis Hengelo.



Figuur 5; NVO profiel Enschede – sluis Hengelo.

2.3 Inschatting van de betrouwbaarheid van model resultaten

In deze paragraaf is de onderzoeksmethode voor het beantwoorden van deelvraag 3 toegelicht. Eerst is uitgelegd op welke manier de waterniveau metingen zijn uitgevoerd en welke meetapparatuur hiervoor beschikbaar is (sectie 2.3.1). Hierna is deelvraag 3a (Sectie 2.3.2) uitgewerkt en tot slot deelvraag 3b (Sectie 2.3.3).

Ter onderbouwing van het model, worden de modelresultaten vergeleken met waterniveau-metingen in de Twentekanalen. Voor deze veldmetingen zijn 7 meetapparaten, zogenaamde divers, beschikbaar. Deze meten de druk van de waterkolom (waterhoogte) boven de diver. Daarnaast is er een barometer beschikbaar, deze meet de luchtdruk. De divers worden in het water gehangen en vastgemaakt aan de kade. Op het moment dat er een verandering van waterstand optreedt meet de diver dat de druk verandert. Deze druk kan worden omgerekend naar een waterstand en dus naar een translatiegolf. Het drukverschil dat optreedt is dus gelijk aan het waterstandsverschil. Er is voor gekozen om de divers zo in te stellen dat ze elke 2 seconden een drukmeting uitvoeren; 2 seconden is het kortste interval mogelijk waarop ongeveer 7 uur gemeten kan worden. Er is gekozen voor een meetinterval van 7 uur, dit was de beschikbare tijd om bij sluis Delden het aantal schuttingen en de schuttijden van sluis Delden en sluis Hengelo te noteren.

Niet alle modelresultaten kunnen worden vergeleken met veldmetingen binnen de beschikbare tijd. Er is daarom een selectie gemaakt van relevante en interessante locaties waarop divers zijn geplaatst, waarmee deelvraag 3a en 3b beantwoord zijn.

2.3.1 Opzet waterniveau metingen

Voor dit onderzoek is het waterniveau zelf niet nodig, maar alleen het verschil in waterstand dat ontstaat door een translatiegolf. Er is dus alleen gekeken naar drukverschillen om een translatiegolf te beschouwen. Om ervoor te zorgen dat alleen de waterdruk wordt meegenomen, is de luchtdruk van de totale druk afgehaald. Luchtdrukvariaties zouden de metingen met enkele centimeters kunnen doen laten afwijken. Om de luchtdruk te meten wordt de barometer gebruikt. Deze werkt net als de divers, maar is alleen voor luchtdruk bedoeld. De barometer geeft een nauwkeurige waarde voor een gebied met een straal tot 15 kilometer, met weinig variërende terreinomstandigheden (Van Essen instruments B.V., 2018)

Om na te gaan wanneer een translatiegolf de divers passeert, is bij sluis Delden het tijdstip van de schuttingen bijgehouden, evenals de totale schuttijd. De verplaatsingssnelheid van de translatiegolf kan eenvoudig worden berekend met $c = \sqrt{gd}$ en de afstand van een sluis tot aan een diver is te bepalen aan de hand van Google Maps. Zo kan een aannemelijke inschatting worden gemaakt van het moment dat de translatiegolf een diver passeert. Met deze informatie zijn geschikte meetlocaties bepaald (Figuur 6).



Figuur 6; Locaties waterniveau-metingen

De 7 divers zijn opgehangen binnen een straal van 15 kilometer van sluis Delden. Om zowel schuttingen van sluis Hengelo als sluis Delden te analyseren zijn in het kanaalpand "Hengelo-Delden" drie divers opgehangen en in het kanaalpand "Delden-Eefde, inclusief zijtak" zijn er vier opgehangen. Hier kan worden gekeken of de translatiegolven voor en na de zijtak zichtbaar zijn.

2.3.2 Waterstandsveranderingen veroorzaakt door translatiegolven

Zoals beschreven, meet de diver de druk in de waterkolom. Deze druk kan worden omgerekend naar het waterniveau. Om de waterkolom of het waterniveau boven een diver te berekenen is in de handleiding voor het gebruik van de divers de volgende formule gegeven (Van Essen instruments B.V., 2018):

$$WC = 9806,65 * \frac{P_{diver} - P_{baro}}{\rho * g} \quad (6)$$

Waarbij:

- De waarde 9806,65 wordt gebruikt om de waterdruk om te zetten naar waterkolom
- WC = Waterkolom boven de diver [cm]
- P_{diver} = De druk gemeten door de diver [cmH2O]
- P_{baro} = De druk gemeten door de barometer [cmH2O]
- ρ = Dichtheid van water [kg/m^3]
- g = zwaartekrachtversnelling: 9,81 [m/s^2]

2.3.3 Nauwkeurigheid model vergeleken met de waterniveau metingen

Om de nauwkeurigheid van het model in te schatten zijn er criteria opgesteld waaraan de betrouwbaarheid kan worden getest:

- Het tijdstip waarop de translatiegolf een diver passeert; Is dit hetzelfde als berekend met de gevonden loopsnelheid?
- De duur van de verandering van het waterniveau; Komt dit overeen met de verwachting vanuit de modelresultaten?
- Het verschil in waterniveau gedurende deze periode; Vertoont dit overeenkomsten met de modelresultaten?

Om de waterniveau metingen te vergelijken met het model zijn metingen geselecteerd. Dit is gedaan op basis van de zichtbaarheid van veranderingen in het waterniveau. Waar een piek in

het waterniveau zichtbaar was is gekeken of dit een translatiegolf is. Daarna is gekeken naar de criteria waaraan de betrouwbaarheid kan worden getest.

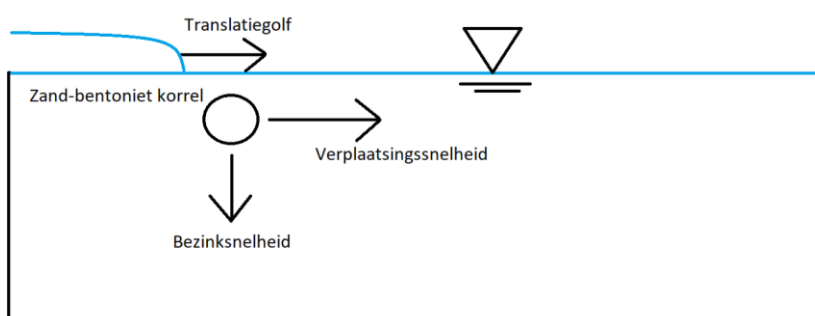
2.4 Hinder door translatiegolven op het aanbrengen van kwelmaatregelen

In deze paragraaf is de onderzoeksmethode ter beantwoording van deelvraag 4 toegelicht. Eerst zal de methode worden toegelicht, hierna volgen aannames die gemaakt zijn en tot slot volgt de berekening ter bepaling van de hinder.

Het doel van deze deelvraag is te bepalen in hoeverre translatiegolven hinder veroorzaken op het aanbrengen van kwelmaatregelen voor de opwaardering van de Twentekanal. In de inleiding is beschreven dat de stroomsnelheid veroorzaakt door een translatiegolf hinder kan veroorzaken tijdens het aanbrengen van kwelmaatregelen. Dit is het geval omdat de kwelmaatregelen bestaan uit het aanbrengen van een zand-bentoniet mengsel op de bodem van het kanaal. Doordat het mengsel uitgespoten wordt op of in het kanaal, kan de stroming onder een translatiegolf ervoor zorgen dat dit mengsel meegenomen wordt. Het mengsel komt dan op een andere locatie terecht dan waar het bedoeld was, waardoor er mogelijk een te dunne laag wordt aangebracht op de bodem van het kanaal. Een te dunne laag zou betekenen dat de kwelmaatregelen niet (goed) werken.

De onderzoeksmethode van deze deelvraag is gebaseerd op een aanname. Het aanbrengen van kwelmaatregelen wordt tijdens de uitvoeringsfase bepaald door de aannemer. Het project Opwaardering Twentekanal bevindt zich nog niet in de uitvoeringsfase. De mogelijkheid bestaat dat het aanbrengen van kwelmaatregelen door de aannemer op een andere manier wordt uitgevoerd dan hierboven beschreven. De verwachting is echter dat het aanbrengen van kwelmaatregelen wordt uitgevoerd vanaf een schip met spuitstuk waarvan een zand-bentoniet mengsel uitgespoten wordt in het kanaal. Hierop is in dit onderzoek de bepaling van hinder gebaseerd.

Bij de bepaling van hinder is gekeken naar waar het zand-bentoniet mengsel op de bodem terecht komt wanneer het meegenomen wordt door een translatiegolf t.o.v. de locatie waar het zonder translatiegolf terecht zou komen; dit wordt de verplaatsingsafstand genoemd. Hiervoor zijn twee aspecten van belang: de bezinksnelheid van het mengsel en de snelheid die het mengsel krijgt door de stroming onder een translatiegolf. De snelheid die het mengsel krijgt door de stroming onder een translatiegolf wordt in deze berekening de verplaatsingssnelheid genoemd. In Figuur 7 is een schematisering van deze situatie gegeven. Op het moment dat het zand-bentoniet mengsel in/op het water wordt uitgespoten zal het zich verspreiden in het water. Het mengsel bestaat dus uit losse zand-bentoniet deeltjes in het water. Voor de berekening van de verplaatsingsafstand wordt gekeken naar losse korrels.



Figuur 7; schematisering van de snelheden die een zand-bentoniet deeltje in het kanaal heeft ten tijde van een translatiegolf.

Om de verplaatsingsafstand van een zand-bentoniet korrel te berekenen is de verplaatsingssnelheid, de bezinksnelheid en de afstand tussen de inlaathoogte en de hoogte van de kanaalbodem nodig. Die afstand wordt in deze berekening de bezinkafstand genoemd.

Aangenomen is dat de verplaatsingssnelheid gelijk is aan de snelheid onder de translatiegolf. In werkelijkheid zal een korrel niet met precies dezelfde snelheid worden meegenomen. De aanname is een overschatting van de werkelijkheid. Met de beschikbare kennis lijkt het echter wel een valide aanname. Om de meest extreme hinder te beschouwen wordt de maximale snelheid onder een translatiegolf die voortkomt uit de modellen gebruikt. De maximale snelheid komt voort uit een één-dimensionaal model, wat betekent dat de snelheid wordt beschouwd als uniforme snelheid. In werkelijkheid zal snelheid bij de bodem lager zijn dan bovenin het kanaal, de snelheid uit het model kan echter gezien worden als de gemiddelde snelheid op dat punt in het kanaal. Een korrel zal praktisch gezien dus niet met exact dezelfde snelheid voortbewegen als is aangenomen, maar wel ongeveer.

De bezinkafstand is een vrije keuze van de aannemer en dus niet bij voorbaat bekend. Er is daarom naar meerdere bezinkafstanden gekeken door de inlaathoogte t.o.v. de bodem aan te passen. De maximale bezinkafstand is gelijk aan de diepte van het kanaal. De diepte van het kanaal zoals in dit onderzoek aangenomen, is bepaald op 3,8 meter. De minimale bezinkafstand wordt bereikt wanneer het mengsel wordt uitgespoten vlak bij de bodem. Er zal altijd een afstand tussen de uitlaat en de bodem zitten op deze manier van aanbrengen. Voor de minimale bezinkafstand is daarom 0,5 meter gekozen.

De bezinksnelheid moet berekend worden. Hiervoor heeft Ruby een afleiding gebruikt (de Klerk et al, 1998). Deze afleiding is gebaseerd op de resulterende krachten op een deeltje in water. Een vallend deeltje in water ondervindt namelijk een weerstand. Het gewicht van het deeltje min de opwaartse hydrostatische drukkracht maakt evenwicht met deze weerstand:

$$(M - \rho V) g = F_{\omega} \quad (7)$$

Waarbij:

- M = Massa van het deeltje [kg]
- ρ = dichtheid van het deeltje [kg/m³]
- V = volume van het deeltje [m³]
- g = zwaartekrachtversnelling, is 9,81 [m/s²]
- F_{ω} = weerstand veroorzaakt door de valsnelheid [N]

Hieruit is de bezinksnelheid van een deeltje afgeleid:

$$\omega = 10v/D \left(\sqrt{1 + \frac{\Delta g D^3}{100v^2}} - 1 \right) \quad \text{Voor } 100 \mu\text{m} < D < 1000 \mu\text{m} \quad (8)$$

Waarbij:

- ω = bezinksnelheid van een korreldeeltje [m/s]
- Δ = dichtheid van een zandkorrel in water, is 1,65 [kg/m³]
- g = zwaartekrachtversnelling, is 9,81 [m/s²]
- D = diameter van een zandkorrel [m]
- v = kinematische viscositeit, is $1 \cdot 10^{-6}$ [m²/s]

In het rapport "Bezinken van zand in hopperzuigers" (de Klerk et al, 1998) is de volledige afleiding gegeven. Formule (8) is gebaseerd op een aantal aannames. De formule is geldig voor een zandkorrel met een diameter tussen 100 en 1000 μm . Het mengsel dat uitgespoten zal worden bestaat echter uit zand-bentoniet, dat deels bestaat uit klei. Er is voor gekozen om voor de geldigheid van de berekening alleen uit te gaan van een mengsel van zand. Klei is namelijk zwaarder en zal dus eerder bezinken. De verplaatsingsafstand wordt iets overschat, maar hierdoor niet onderschat. Omdat wanneer bentoniet meegenomen zou worden in de berekening, het mengsel eerder zou bezinken en de verplaatsingsafstand verkleind zou worden. De dichtheid van een zandkorrel in water is hier aangenomen op 1,65 kg/m^3 . De kinematische viscositeit is aangenomen a.d.h.v. een watertemperatuur van tussen de 10 en 20 graden Celsius.

Er zullen voor de berekening meerdere diameters van zandkorrels worden ingevoerd om het effect van de verschillende korrelgroottes te bepalen. Ook is het op deze manier mogelijk om een indicatie te geven van wat er gebeurt als er meerdere korrels samengeklonterd zijn. De minimale korrelgrootte van 100 μm , een gebruikelijke korrelgrootte van zand van 200 μm en de maximale korrelgrootte van 1000 μm worden vergeleken.

2.4.1 Verplaatsingsafstand

Nadat de bezinksnelheid berekend is, kan de bezinktijd berekend worden. De bezinktijd is de bezinkafstand gedeeld door de bezinksnelheid. De bezinktijd is de tijd vanaf het inlaten van een korrel totdat het op de bodem ligt. Op het moment dat het deeltje op de bodem ligt wordt het niet meer verplaatst. Dit betekent dat de bezinktijd gelijk is aan de tijd dat waarin het deeltje verplaatst wordt, de verplaatsingstijd. De verplaatsingsafstand kan dan uitgerekend worden door de verplaatsingstijd te vermenigvuldigen met de verplaatsingssnelheid.

In paragraaf 3.4 zijn grafieken voor elke korrelgrootte gegeven waarbij de verplaatsingsafstand is uitgezet tegen de bezinkafstand.

3. Resultaten

In dit hoofdstuk zijn de resultaten per onderzoeksvraag gegeven. In de eerste paragraaf is het resultaat van de analytische berekening van translatiegolfhoogte en stroomsnelheid onder de translatiegolf gegeven. De tweede paragraaf bevat de modellering in Sobek met als resultaat de golfhoogte en stroomsnelheid, die vergeleken zijn met de analytische berekening. In paragraaf 3.3 volgt de inschatting van de betrouwbaarheid van het Sobek model. Tot slot zijn in paragraaf 3.4 de extreme waarden voor stroomsnelheid onder een translatiegolf gebruikt om de mogelijke hinder op het aanbrengen van kwelmaatregelen te bepalen.

3.1 Analytische berekening van translatiegolfhoogte en stroomsnelheden

Voor de analytische berekening is gebruik gemaakt van het maximale nivelleerdebiet bij op- en/of afschutten van de drie sluizen. Het dwarsprofiel van het kanaal net na de sluis is gebruikt voor de afmetingen benodigd voor de analytische berekening.

Translatiegolfhoogte en stroomsnelheden

Het invullen van de formules uit de methode in paragraaf 2.1 geeft een maximale translatiegolfhoogte en een maximale stroomsnelheid onder de translatiegolf. Deze zijn weergegeven in Tabel 1. Bij het hoogste debiet ontstaat ook de hoogste stroomsnelheid en de hoogste translatiegolfhoogte. Dit betekent dat het maximale nivelleerdebiet dus ook de maximale stroomsnelheid en translatiegolfhoogte bepaald.

Tabel 1; Maximale waarden voor stroomsnelheid en translatiegolfhoogte.

Sluis schutting	Maximaal nivelleer- debiet [m ³ /s]	Stroomsnelheid [m/s]			Translatiegolfhoogte [m]		
		Sobek	Analytisch	Vershil	Sobek	Analytisch	Vershil
Hengelo Oost, opschutten	-47,6	-0,27	-0,26	0,01	-0,12	-0,16	0,04
Hengelo West, afschutten	52	0,27	0,28	0,01	0,15	0,17	0,02
Delden Oost, opschutten	-10	-0,05	-0,05	0,00	-0,03	-0,03	0,00
Delden West, afschutten	20	0,11	0,11	0,00	0,06	0,07	0,01
Eefde Oost, opschutten	-39	-0,22	-0,21	0,01	-0,11	-0,13	0,02

3.2 Modelleren van het verloop van translatiegolven door de Twentekanalen

In deze paragraaf staan eerst de Sobek model resultaten. Daarna is de scenario bepaling besproken.

Sobek model resultaten

Met het simuleren van de sluischuttingsen in de verschillende kanaalpand modellen zijn meerdere uitkomsten gevonden.

Ten eerste blijken de maximale waardes voor translatiegolfhoogte en stroomsnelheid onder de translatiegolf zich overal aan het begin van het kanaalpand te bevinden. Dit komt omdat het debiet hier nog maximaal is. In Tabel 1 zijn deze waardes gegeven. In dezelfde tabel staan ook de uitkomsten van de analytische berekening, zodat deze tabel ook gebruikt kan worden voor de vergelijking van de uitkomsten tussen de numerieke Sobek berekeningen en de analytische berekeningen.

Er vallen een aantal punten op. De stroomsnelheid is nagenoeg gelijk aan elkaar en kent alleen verwaarloosbare verschillen. Verder valt op dat de translatiegolfhoogte overal minimaal afwijkt (afwijking van 0,02 à 0,03 meter), maar dit zijn ook minimale verschillen. Geconcludeerd kan worden dat het model zeer goed overeenkomt met de analytische resultaten.

Ten tweede blijkt dat tijdens het verloop van een translatiegolf door een kanaalpand weinig uitdemping en weinig verlaging van de stroomsnelheid optreedt. Bij versmallingen en verbredingen in de vorm van zwaaikommen, aftakkingen en brug(hoofden) treedt wel een effect op. De versmalling zorgt ervoor dat de translatiegolf lokaal wordt versterkt en hierna juist verzwakt (omdat het profiel dan weer verbreedt). De verbreding zorgt ervoor dat de translatiegolf wordt verzwakt. Er blijkt relatief weinig van de translatiegolf teruggekaatst te worden op deze punten. Aan het eind van kanaalpanden "Enschede – sluis Hengelo" en "sluis Hengelo – sluis Delden" is de afname van de translatiegolfhoogte ongeveer 0,05 meter en de stroomsnelheid met maximaal 0,10 m/s afgenomen. In het kanaalpand "sluis Delden – sluis Eefde" komen echter zo veel verbredingen en voornamelijk versmallingen voor dat de uitdemping hier 0,10 meter is en de stroomsnelheid afneemt met ongeveer 0,17 m/s.

Aandacht is hierbij voor het "Kristalbad" bij camping De Zwaaihoek. Dit is de meest extreme verbreding van alle kanaalpanden. Dit leidt er echter niet toe dat een translatiegolf hierdoor volledig uit dempt. Het effect is duidelijk te zien ter hoogte van de verbreding. De stroomsnelheid is lager en de translatiegolfhoogte is gehalveerd. Wanneer de translatiegolf het Kristalbad echter gepasseerd is, is de translatiegolfhoogte maar met 0,03 meter verminderd en de stroomsnelheid maar met 0,05 m/s.

Op sommige punten is er meer uitdemping van een translatiegolf dan op andere. In het kanaalpand Delden-Eefde, inclusief zijtak verliest de translatiegolf, die ontstaat bij sluis Delden, bij de zijtak al de helft van zijn debiet. Dit komt omdat de translatiegolf zich hier in tweeën splitst in de zijtak richting Almelo en door de hoofdtak richting Eefde. Dit is een niet al te hoge translatiegolf (0,06 meter) waardoor de effecten van deze golf na de splitsing, een halvering van de translatiegolfhoogte, klein zijn. De splitsing naar de zijtak zorgt ook bij de translatiegolf vanuit sluis Eefde voor een halvering van het debiet. Dit is bij het ontstaan een veel grotere translatiegolf dan degenen die ontstaan bij sluis Delden, echter is de afstand tot de zijtak ook vele malen groter. Translatiegolven kennen weinig uitdemping, maar de afstand en de hoeveelheid versmallingen en verbredingen zorgen ervoor dat ook deze translatiegolf bij de splitsing naar de zijtak weinig effect meer sorteert. Uiteindelijk betekent dit voor de zijtak dat hier geen translatiegolven boven de 0,05 à 0,06 meter voorkomen en dat de stroomsnelheid niet boven de 0,08 m/s uit komt.

Het derde en laatste punt dat volgt uit de modellering met Sobek is dat de weerkaatsing van een translatiegolf bij een sluis ervoor zorgt dat de translatiegolfhoogte en stroomsnelheid afnemen. Het “verlies” bij het weerkaatsen bedraagt ongeveer 0,04 meter translatiegolfhoogte en 0,10 m/s van de stroomsnelheid.

Combinaties van sluisschuttingen (scenario's)

Zoals genoemd zijn er combinaties van sluisschuttingen onderzocht. Allereerst bij het weerkaatsen van een enkele translatiegolf. Uit de model resultaten blijkt dat bij het terugkaatsen van een translatiegolf hier veel verlies optreedt. De overgebleven translatiegolf zou in theorie een nieuwe translatiegolf kunnen tegen komen vanaf dezelfde sluis. Wanneer deze twee translatiegolven elkaar tegenkomen zullen ze met elkaar interfereren. Hierbij wordt alleen de translatiegolfhoogte verhoogd, de snelheid is immers in tegengestelde richting. Deze tijdelijke verhoging zal echter door de geringe omvang van de teruggekaatste translatiegolf naar verwachting weinig hinder veroorzaken. Bovendien zullen de pieken van de twee verschillende translatiegolven maar op één punt met elkaar interfereren, waardoor de maximum translatiegolfhoogte alleen heel lokaal wordt verhoogd.

Ook bestaat de mogelijkheid dat translatiegolven van twee verschillende sluizen elkaar beïnvloeden. Door middel van het uitvoeren van testen met de modellen en de modelresultaten te vergelijken met de waarden voor translatiegolven van één enkele sluisschutting is het volgende gevonden. Aangezien de ene translatiegolf door afschutten wordt veroorzaakt en de andere door opschutten is de ene positief en de andere negatief, interferentie leidt dus alleen tot een verlaging van de translatiegolfhoogte. Hét punt waarbij twee translatiegolven elkaar kunnen versterken op de Twentekanalen is de aftakking naar de zijtak. Een translatiegolf uit Eefde, die hier samen komt met een translatiegolf uit Delden zou ervoor zorgen dat het debiet bij elkaar opgeteld kan worden. Dit zou resulteren in een hogere stroomsnelheid. De simulatie van deze sluisschuttingen geven echter aan dat de translatiegolven bij de zijtak nog maar van geringe omvang zijn, zoals aangegeven in het kopje “Sobek model resultaten” van paragraaf 3.2. Naar aanleiding van bovenstaande is besloten om combinaties van sluisschuttingen niet te modelleren. Naar verwachting levert dit geen grotere translatiegolven op.

3.3 Validatie van model resultaten

In deze paragraaf is eerst de waterstandsverandering die veroorzaakt wordt door translatiegolven beschreven. Daarna volgt een analyse van de nauwkeurigheid van de gemodelleerde translatiegolfhoogtes op basis hiervan.

Er is voor gekozen om de waterniveau meting van de diver te beschouwen die zich ongeveer tussen sluis Hengelo en sluis Eefde bevindt. Waterniveau metingen van de divers na de splitsing met de zijtak blijken zoals verwacht een lage translatiegolf te hebben, maar daardoor is het niet met zekerheid te zeggen dat in de waterniveau metingen ook werkelijk de translatiegolf is zien. De waterniveau meting van de diver aan de westkant van sluis Hengelo bleek de translatiegolven duidelijk te meten, op de met de loopsnelheid berekende juiste momenten, maar bevatte een veel te hoge translatiegolf. Dit is te verklaren met het gegeven dat de translatiegolf tegen de sluisdeur “aanbotst” en het water zich daarbij ophoopt voordat het weerkaatst. Het doel van de validatie was echter om de translatiegolven te vergelijken die zich door het kanaal heen verplaatsen en dus is ook deze meting niet gebruikt. De overige waterniveau metingen van de divers bleken geschikt om te gebruiken voor de validatie met model resultaten. Er is hierna voor gekozen om meerdere metingen

van één diver in het rapport te laten zien en niet van alle divers, omdat de validatie niet het hoofddoel van dit onderzoek is en de andere divers vergelijkbare resultaten geven.

Waterstandsverandering veroorzaakt door translatiegolven op basis van veldmetingen

De diver te midden van kanaalpand "sluis Hengelo – sluis Delden" heeft acht dalen gemeten (negatieve translatiegolven, dus verlaging waterniveau). In bijlage C staat de waterniveau meting van deze diver. Er zijn bij sluis Delden gedurende de meetperiode zeven opschuttingen genoteerd. Het verschil tussen het noteren en de meting is ontstaan doordat de opschutting die zorgde voor het eerste dal dat te zien is op de meting, om ongeveer 14:00 plaatsvond en het noteren toen nog niet was begonnen.

De dalen veroorzaakt door translatiegolven duren ongeveer even lang en hebben in de meeste gevallen ook dezelfde waterniveau-verandering. Er is ingezoomd op drie dalen. Hierbij is gekeken naar de criteria uit paragraaf 2.3 die de nauwkeurigheid van de modelresultaten moeten aantonen. In Tabel 2 staan de bijbehorende waardes.

Tabel 2; waardes criteria waterniveau metingen

	Max. Translatiegolfhoogte (verschil in waterniveau). [m]	Duur van een translatiegolf. [min]	Afwijking t.o.v. het tijdstip waarop de maximale translatiegolfhoogte verwacht werd. [min]
Dal a (Bijlage D1)	-0,06	14	+2
Dal b (Bijlage D2)	-0,09	18	+2
Dal c (Bijlage D3)	-0,07	14	+2

Uit Tabel 2 volgt dat de maximale translatiegolfhoogte op het kanaal minimaal -0,06 meter is en maximaal -0,09 meter. De duur van een translatiegolf ligt tussen de 14 en 18 minuten. Bij dal b is zowel de duur als de translatiegolfhoogte groter dan bij de andere dalen. Dit verschil is lastig te verklaren met de waarnemingen, maar het is mogelijk dat externe factoren zoals bijvoorbeeld de wind de meting hebben beïnvloed. Mogelijk was de schutting die bij de translatiegolf hoort ook groter. De afwijking t.o.v. de tijd dat een translatiegolf verwacht werd is overal 2 minuten. Hieruit kan geconcludeerd worden dat loopsnelheid van de translatiegolven overschat werd. De afwijking is elke keer gelijk en dus is de berekening van het tijdstip correct uitgevoerd.

Nauwkeurigheid van de gemodelleerde translatiegolfhoogtes vergeleken met de waterniveau metingen

Wanneer de waterniveau metingen worden vergeleken met de model resultaten vallen twee dingen op. De translatiegolfhoogte zou volgens berekeningen -0,03 meter moeten zijn op dezelfde locatie als het meetpunt. De minimale waarde is echter -0,06 meter en maximaal is het -0,09 meter. Ook is de duur van een translatiegolf maximaal ongeveer 18 minuten en minimaal 14 minuten, dit is langer dan de 12 minuten die voor de schuttijd zijn gemeten. Een verklaring hiervan kan zijn dat de translatiegolven diffusie vertoonden en hierdoor dus langer duurden. Het tijdstip waarop deze translatiegolven de diver passeerde kwam op 2 minuten na overeen met het verwachte tijdstip.

Het tijdstip waarop de translatiegolf de diver passeerde en de duur van de translatiegolven zijn verklaard. Het verschil in translatiegolfhoogte is echter aanzienlijk groot. Een verklaring hiervoor is dat waarschijnlijk de nivelleerdebietcurve en het daarbij horende maximale nivelleerdebiet dat gevonden is in de literatuur niet correct is. Dit leek van tevoren al aan de lage kant, maar omdat het verval kleiner is bij sluis Delden dan bij de andere sluizen en de berekeningen in de literatuur correct waren is met deze waarde gerekend.

Concluderend, kan er gesteld worden dat het mogelijk is om translatiegolven te meten op de Twentekanal. De modelresultaten kwamen op een aantal punten overeen met de metingen, maar op het punt van translatiegolfhoogte niet. Het is goed te voorspellen op welk tijdstip een translatiegolf een bepaald punt passeert en wat de tijdsduur is van een translatiegolf op dit punt. Dit bevestigt dat de modelresultaten betrouwbaar zijn. De gemeten translatiegolfhoogte komt niet overeen met de modelresultaten. Komt dit inderdaad door incorrecte gegevens uit de literatuur dan is het goed mogelijk dat de waarden wel overeenkomen met correcte gegevens. Dit is echter niet zeker en daarom kan er ook niet met zekerheid gezegd worden dat de meetresultaten bevestigen dat de modelresultaten betrouwbaar zijn.

3.4 Hinder door translatiegolven op het aanbrengen van kwelmaatregelen

Deze paragraaf beschrijft het resultaat van deelvraag 4. Met de in de onderzoeksmethode beschreven korreldiameters en bezinkafstanden is de verplaatsingsafstand t.o.v. een bezinkafstand weergegeven per korreldiameter.

Er is gekozen voor de korreldiameters in Tabel 3. De minimale diameter van 100 μm is gekozen omdat dit de ondergrens van de formule is en dit voor een gemiddelde zandkorrel al klein is. De korreldiameter 200 μm is de gemiddelde grootte van de zandkorrels die naar alle waarschijnlijkheid gebruikt worden in het zand-bentoniet mengsel. De korreldiameters van 1000 μm zijn gebruikt om de invloed van de samenklontering weer te geven.

Tabel 3: gebruikte korreldiameters voor berekening

Korreldiameter [μm]
100
200
1000

De bezinkafstanden die zijn gekozen staan in Tabel 4. Voor de kleinste bezinkafstand is 0,5 meter gekozen. De grootste bezinkafstand is gekozen op 3,8 meter, gelijk aan de kanaaldiepte voor de modelberekeningen. Tussen het minimum en maximum is ook nog de bezinkafstand van 2 meter gekozen om te zien wat dit doet met de berekeningen.

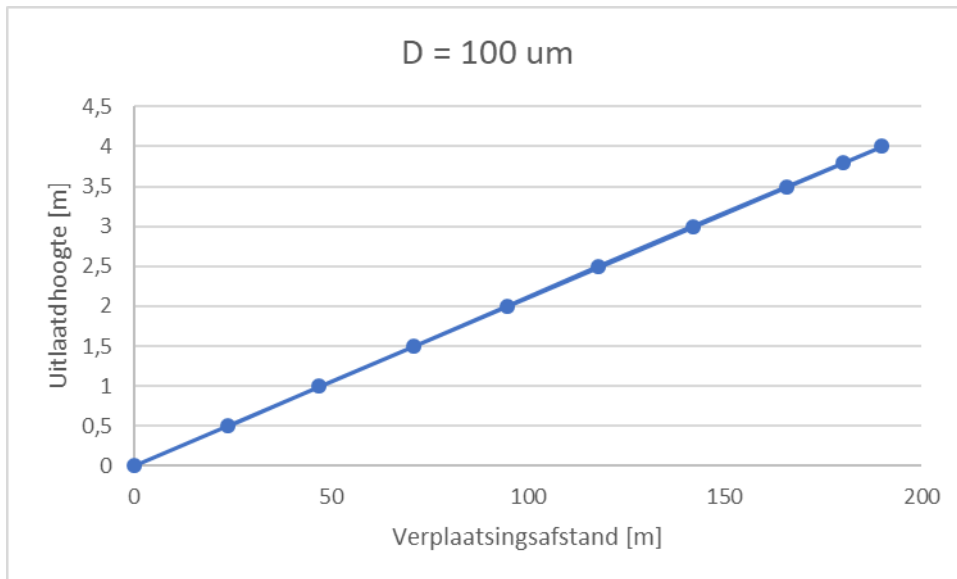
Tabel 4: bezinkafstanden

Bezinkafstand [m]
0,5
2
3,8

De stroomsnelheid waarmee de bezinksnelheid is vergeleken volgt uit de model resultaten. Zowel Hengelo Oost als West hebben een stroomsnelheid van ongeveer 0,27 m/s en ook bij sluis Eefde Oost is met 0,22 m/s de stroomsnelheid niet heel anders. Er is daarom gekozen om met de maximumwaarde van 0,27 m/s te rekenen.

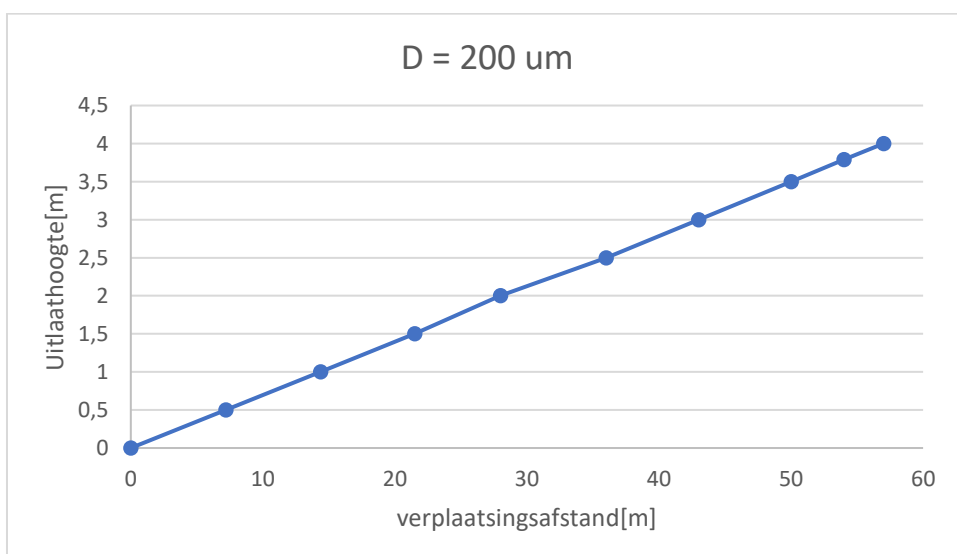
Verplaatsingsafstand

In Figuur 8 is te zien hoe de verplaatsingsafstand is uitgezet tegenover de uitlaathoogte voor een zandkorrel met een diameter van 100 micrometer. Dit is de meest extreme situatie en is voor zandkorrels met een grotere diameter niet meer aan de orde. Hier is namelijk de verplaatsingsafstand bij een uitlaathoogte van 4 meter al bijna 200 meter.



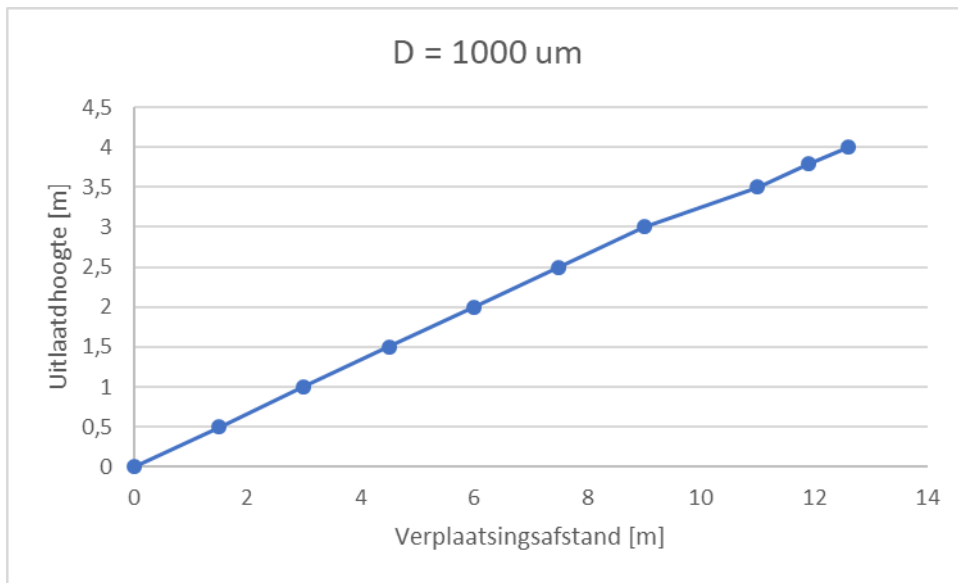
Figuur 8; Verplaatsingsafstand t.o.v. de bezinkafstand voor een zandkorrel met diameter 100 um.

In Figuur 9 is bij een uitlaathoogte van 4 meter de verplaatsingsafstand namelijk al minder dan 60 meter. Dit komt door de aard van de formule van Ruby, waarbij een iets kleinere korrel al veel meer invloed heeft op de verplaatsingsafstand.



Figuur 9; Verplaatsingsafstand t.o.v. de bezinkafstand voor een zandkorrel met diameter 200 um.

In figuur 10 staat de verplaatsingsafstand uitgezet tegen de uitlaathoogte voor een samenklontering van korrel, met korreldiameter 1000 micrometer.



Figuur 10; Verplaatsingsafstand t.o.v. de bezinkafstand voor een zandkorrel met diameter 1000 μm .

Kleine korrels hebben een veel grotere kans om meegevoerd te worden dan grotere korrels en daarom zorgen kleinere korrels dus ook voor een groter risico tijdens het aanbrengen van kwelmaatregelen. Echter wordt het mengsel dicht bij de bodem uitgelaten dan is het verschil in verplaatsingsafstand veel minder groot. Bij 0,5 meter uitlaathoogte is bij de kleine korrels van 100 μm de verplaatsingsafstand 20 meter, bij een korrel van 200 μm is dit 8 meter en bij 1000 μm is dit 2 meter. Dit is onder de aanname dat het volledige mengsel bestaat uit zand en dus niet uit zand en klei (bentoniet). Klei is over het algemeen iets zwaarder dan zand bij hetzelfde volume en dus de verplaatsingsafstand alleen maar verminderen wanneer klei wordt meegenomen in de berekening.

Daarbij is deze methode een inschatting van de werkelijkheid die de verplaatsing van korrels overschat. Voor een inschatting van het risico is het daarom een goede methode. In het geval dat de berekende verplaatsingsafstand van een korrel of mengsel geen problemen oplevert dan is het ook zeker dat bij een exactere berekening dit niet gebeurt, omdat een exactere berekening de verplaatsingsafstand waarschijnlijk alleen zal verminderen.

4. Discussie

Dit hoofdstuk bevat discussiepunten die mogelijke beperkingen van het onderzoek aangeven en de invloed die deze punten hebben op de conclusie van het onderzoek.

De nivelleerdebeten bij sluis Delden zijn aanzienlijk lager in vergelijking tot de andere twee sluizen. In acht genomen dat het verval bij sluis Delden kleiner is en de berekening zoals deze gegeven is in de RINK-rapportages (Voortman et al., 2012) van het nivelleerdebiet leek te kloppen, zou dit een aannemelijk debiet zijn. Tijdens het uitvoeren van de waterniveaumetingen en het bijhouden van de schutting bij sluis Delden is gebleken dat het geschetste nivelleerdebiet voor het opschutten bij sluis Delden niet mogelijk is. Voor het nivelleren van een volle sluiskolk in 12 minuten is bij constant debiet, een debiet van ongeveer $15 \text{ m}^3/\text{s}$ nodig. Omdat het debiet niet constant is, maar eerst sterk stijgt vanaf $0 \text{ m}^3/\text{s}$ en daarna langzaam terugloopt moet het maximale debiet nog iets hoger liggen. Dit resulteert erin dat de metingen die gebaseerd zijn op de opschuttingen bij sluis Delden niet overeenkomen met de gemodelleerde waarden voor translatiegolfhoogte. Ook zal de maximale translatiegolfhoogte en stroomsnelheid hoger zijn dan is gemodelleerd. Daarbij blijft sluis Delden in verhouding de sluis met het kleinste verval en zullen de maximale waarden niet hoger zijn dan berekend voor translatiegolven die ontstaan bij sluis Eefde en sluis Hengelo. Voor de hinder door stroomsnelheid onder een translatiegolf zal dan naar verwachting ook niets veranderen.

Het berekenen van de hinder is gedaan door meerdere aannames te doen. Bij de meeste van deze aannames zal dieper onderzoek een waarde geven die ertoe leidt dat de maximale snelheid onder een translatiegolf wordt verlaagd. Bij de meeste aannames is namelijk de waarde gebruikt die, voor zover realistisch, een grotere translatiegolf veroorzaakt. Hier is voor gekozen zodat niet achteraf kan blijken dat er toch een grotere translatiegolf mogelijk is, die ook grotere gevolgen kan hebben. De aanname die de diepte van het kanaal betreft, is echter wel een aanname die de verplaatsingsafstand kan onderschatten. In werkelijkheid zal de diepte en dus de inlaathoogte t.o.v. de bodem groter zijn. Met ingebouwde marges wordt ervoor gezorgd dat de diepte niet minder dan 3,8 meter wordt. In een gemiddelde situatie zal de diepte dus meer zijn dan 3,8 meter. Ook zorgen positieve translatiegolven ervoor dat de het waterniveau tijdelijk hoger komt te liggen. De verplaatsingsafstand is afhankelijk van de diepte, bij een grotere diepte ontstaat een grotere verplaatsingsafstand. Dit zou ertoe kunnen leiden dat de verplaatsingsafstand groter is dan berekend. Waarschijnlijk is dit echter niet een dusdanig grotere verplaatsingsafstand.

Voor de bepaling van de verplaatsingsafstand is ook aangenomen dat een zand-bentoniet korrel met een eenparige beweging bezinkt en met een eenparige beweging wordt meegevoerd door een translatiegolf. In werkelijkheid zullen de korrels een meer op en neer gaande beweging maken tijdens het bezinken. Mede doordat de stroomsnelheid in werkelijkheid geen uniforme snelheid heeft, zoals wel is aangenomen. Het gebruik van het één-dimensionale Sobek model leidt ertoe dat het lijkt of de stroomsnelheid onder een translatiegolf uniform is, terwijl in werkelijkheid de stroomsnelheid bij de bodem lager is dan bovenin het kanaal. Daarnaast is ook de aanname gemaakt dat een korrel met dezelfde snelheid wordt meegevoerd als de stroomsnelheid die door een translatiegolf ontstaat, dit is echter een overschatting van de werkelijkheid die mogelijk niet valide genoeg is om te gebruiken. De beschikbare literatuur en kennis op dit vlak was niet toereikend om hier een definitief antwoord op te geven, maar voor een indicatie van de werkelijkheid lijkt het een reële aanname.

5. Conclusie

De hoofdvraag van dit onderzoek is “ *In hoeverre kunnen translatiegolven optreden op de Twentekanal en kunnen translatiegolven hinder veroorzaken tijdens de uitvoering van de geplande werkzaamheden voor de opwaardering van de Twentekanal?*”

Ter beantwoording van de hoofdvraag waren ook een aantal deelvragen opgesteld. De conclusies die zijn getrokken uit de deelvragen geven een antwoord op de hoofdvraag van dit onderzoek.

Uit de analytische berekeningen blijkt bij het maximale nivelleerdebiet wat de maximale stroomsnelheid onder de translatiegolf en de maximale translatiegolfhoogte is bij het af- of opschutten per sluis. Het blijkt dat er per sluisschutting een duidelijk verschil in deze waarden zit (Tabel 1).

Met de modellering met Sobek blijkt dat het maximale nivelleerdebiet per sluisschutting ook de grootste waarden voor stroomsnelheid en translatiegolfhoogte oplevert gedurende het verloop door een kanaalpand. Vergelijking van de resultaten van het Sobek model met de analytische berekeningen laten weinig verschil hiertussen zien (Tabel 1).

Volgens het Sobek model dempt een translatiegolf in een kanaalpand weinig uit, enkele centimeters door verbredingen en versmallingen in het kanaal profiel. Bij veel verbredingen en versmallingen is uitdemping duidelijke te zien. Weerkaatsing van de translatiegolf zorgt ervoor dat er wel een aanzienlijke afname van hoogte en stroomsnelheid ontstaat.

In de onderzochte scenario's is gebleken dat er geen combinaties kunnen ontstaan waarbij twee sluisschuttingen tot een extreme situatie leiden, omdat ze er gezamenlijk voor zorgen dat de resulterende translatiegolven elkaar versterken.

De vergelijking van de waterniveau metingen met de modelresultaten geeft geen eenduidige conclusie of de modelresultaten a.d.h.v. de metingen betrouwbaar zijn. Kijkend naar de tijdsduur en het tijdstip van passeren komen de werkelijkheid en de modellen goed overeen. Echter wijkt de translatiegolfhoogte in de metingen af van de modelresultaten, -0,07 meter gemiddeld van de metingen tegenover -0,03 meter in de modelresultaten. Ontstaat de afwijking inderdaad door incorrecte gegevens uit de literatuur, dan is het met correcte gegevens te bepalen of de modelresultaten dan wel overeenkomen met de metingen.

Door met de maximale stroomsnelheid onder een translatiegolf te bepalen hoe ver een zand-bentoniet korrel kan worden verplaatst is de hinder op het aanbrengen van kwelmaatregelen bepaald. Bij een inlaathoogte t.o.v. de bodem van 4 meter zal een gemiddelde zand-bentoniet korrel met korrelgrootte van 200 μm een verplaatsingsafstand van ongeveer 55 meter hebben. Bij eenzelfde korrel met een inlaathoogte t.o.v. de bodem van 0,5 meter wordt dit gereduceerd tot ongeveer 7 meter. Bij elke korrelgrootte geldt dat hoe lager de inlaathoogte t.o.v. de bodem is, hoe kleiner de verplaatsingsafstand is.

6. Aanbevelingen

Dit hoofdstuk bestaat uit twee onderdelen. Het eerste deel bevat adviezen aan Rijkswaterstaat met betrekking tot hinder die ontstaat door translatiegolven op het aanbrengen van kwelmaatregelen. Het tweede deel bevat aanbevelingen voor vervolgonderzoek.

6.1 Advies aan Rijkswaterstaat

Het advies betreffende het aanbrengen van kwelmaatregelen, in dit geval aanbrengen van zand-bentoniet mengsel, is om deze zo dicht mogelijk bij de bodem aanbrengen. Hoe dichter de kwelmaatregel bij de bodem wordt ingelaten, hoe kleiner de verplaatsingsafstand is. Hierbij moet de verhouding t.o.v. de prijs wel in acht worden genomen. Is het vele malen goedkoper om het aanbrengen ter hoogte van het kanaaloppervlak uit te voeren, dan zou de grotere verplaatsingsafstand een acceptabel gevolg kunnen zijn. De verplaatsingsafstand is namelijk te overzien.

Daarnaast is een verlaging van de stroomsnelheid ook mogelijk. Dit betreft een tijdelijke maatregel gedurende de uitvoeringswerkzaamheden. De hoogste stroomsnelheid ontstaat bij het hoogste debiet, wanneer er wordt besloten om langzamer te schutten kan het maximale debiet worden verlaagd. Omdat de stroomsnelheid afneemt, neemt de verplaatsingsafstand af en wordt het probleem dat het mengsel meegenomen wordt door een translatiegolf verminderd.

6.2 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

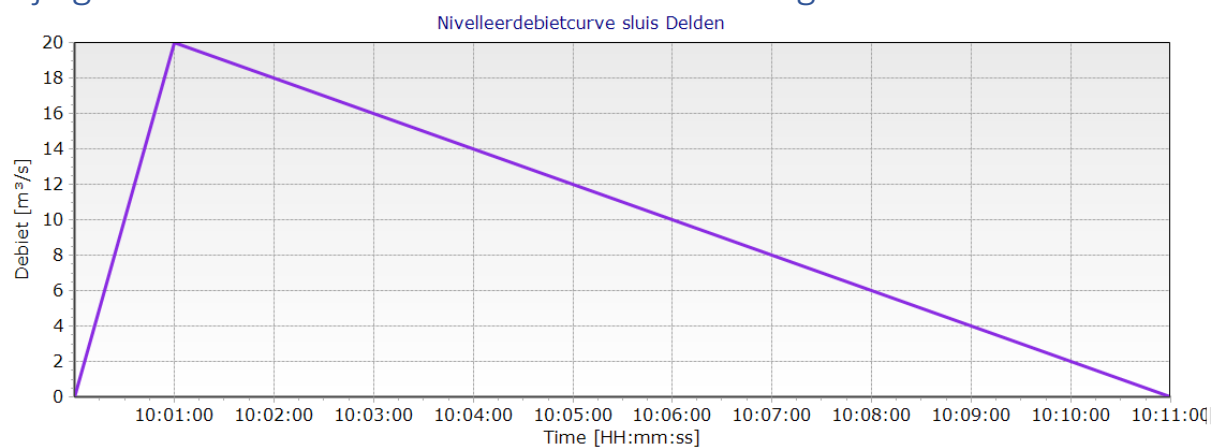
Als aanbeveling voor vervolgonderzoek is het nader onderzoeken van de verspreiding van korrels in stromend water van belang, indien een exactere berekening van de verplaatsingsafstand gewenst is. Er zijn meerdere aannames gedaan in de berekening van de verplaatsingsafstand en daarom is deze niet gelijk aan de werkelijkheid. Het is een inschatting van de werkelijkheid die de verplaatsing van korrels overschat. Voor een inschatting van het risico is het daarom wel een goede methode. In het geval dat de berekende verplaatsingsafstand van een korrel of mengsel geen problemen oplevert dan is het ook zeker dat bij een exactere berekening dit niet gebeurt, omdat een exactere berekening de verplaatsingsafstand waarschijnlijk alleen zal verminderen.

Hiernaast zal een nieuw onderzoek bij sluis Delden naar het nivelleerdebiet dat bij een sluisschutting ontstaat ervoor zorgen dat modelresultaten dichter bij de werkelijkheid staan, omdat deze in de vergelijking met de veldmetingen een afwijkende waarde geeft. Berekeningen met het nieuwe nivelleerdebiet zouden in de toekomst gemakkelijk gemaakt kunnen worden door de analytische berekening te gebruiken. Door de vergelijking van de analytische methode met de numerieke Sobek methode is gebleken dat er maar weinig afwijking tussen zit, wat betekent dat de analytische methode nauwkeurige resultaten geeft. De analytische methode kan dan gebruikt worden, omdat dat deze snel en eenvoudig te gebruiken is.

Referenties

- Battjes, J. A., & Labeur, R. J. (2014). *Open channel flow*. TU Delft.
- Battjes, P. J. (2000). *Stroming in Waterlopen*. TU Delft.
- de Klerk et al, A. (1998). *Bezinken van zand in hopperzuigers - Invloed van turbulentie en korrelverdeling*. Delft: TU Delft.
- Deltares. (2015). *Sobek 3, D-Flow 1D ; User Manual*. Delft: Deltares.
- Deltares. (2015, september 14). *Sobek 3, hydrodynamics, technical reference manual*. Version 3.0.1. Delft, Nederland.
- Deltares. (2018). *Debiet curve nieuwe sluis Eefde*.
- Helpdesk Water. (2019, juni 12). *helpdesk water*. Opgehaald van www.helpdeskwater.nl:
<https://www.helpdeskwater.nl/algemene-onderdelen/structuur-pagina/stuur/@184854/sobek/>
- JW aerial shots. (2016, Juni 05). *Sluis Eefde 03-06-2016*.
- Rijkswaterstaat. (2016, februari 12). *Twentekanaal 80 jaar*. Opgehaald van rijkswaterstaat.nl:
<https://www.rijkswaterstaat.nl/nieuws/2016/02/twentekanaal-80-jaar.aspx>
- Rijkswaterstaat. (2019, April 14). *Vaarwegenoverzicht Twentekanaal*. Opgehaald van
<https://www.rijkswaterstaat.nl/water/vaarwegenoverzicht/twentekanalen/index.aspx>
- Rijkswaterstaat Oost-Nederland. (2019, juni 7). *Geoweb*. Opgehaald van
geoservices.intranet.rijkswaterstaat.nl:
https://geoservices.intranet.rijkswaterstaat.nl/wm/geoweb51/index.html?viewer=Twentekanalen_RWS_ON.Webviewer
- Rijkswaterstaat WVL afdeling BNSV. (2017). *Richtlijn vaarwegen 2017*.
- Universiteit Twente. (2017). *Syllabus course 1A veiligheid en risico's in delta's; flow in open channels*. Opgehaald van https://blackboard.utwente.nl/bbcswebdav/pid-1075186-dt-content-rid-2666224_2/courses/2017-201700181-1A/2017_08_30_lecture_notes_open_channel_flow.pdf
- Van Essen instruments B.V. (2018). *Producthandleiding TD-Diver en baro-diver - DI8xx Serie*.
- Visstandbeheercommissie. (2019, 04 25). *VBC Twentekanaal*. Opgehaald van
visstandbeheercommissie.nl:
https://www.visstandbeheercommissie.nl/vbc_s/13/twentekanaal/
- Voortman et al., D. I. (2012). *Integrale rapportage Delden - Bijlage 16: Beoordeling Veiligheid vul- en ledigproces RINK 2011-Cluster 2*. Amersfoort.
- Wilbrink et al., I. V. (2012). *Integrale rapportage Hengelo - Bijlage 16: Beoordeling Veiligheid vul- en ledigproces RINK 2011-Cluster 2*. Amersfoort.

Bijlage A – Nivelleerdebietcurve van afschutting sluis Delden



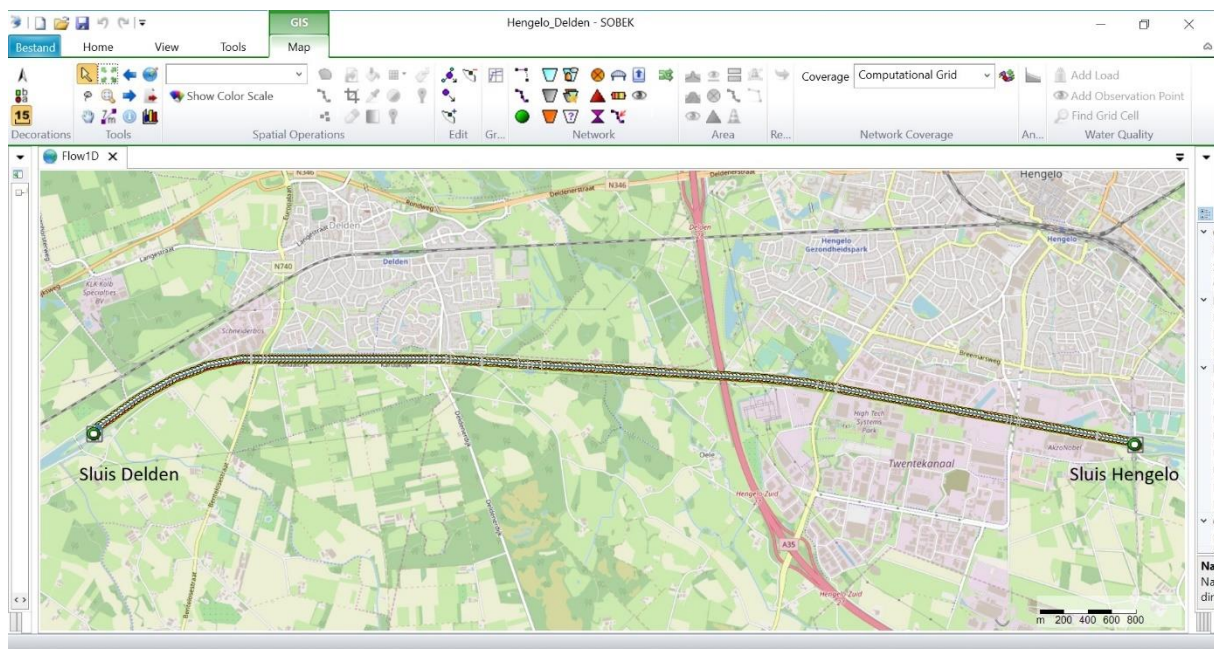
Figuur 11; In Sobek ingevulde nivelleerdebiet curve voor de afschutting bij sluis Delden.

Bijlage B – Kanaalpand modellen

In deze bijlage staan de kanaalpand modellen “sluis Hengelo-sluis Delden” en “sluis Delden-sluis Eefde, inclusief de zijtak” beschreven. Net als voor kanaalpand model “Enschede-sluis Hengelo” is een Sobek kaart hiervan gegeven. De dwarsprofielen staan niet beschreven, omdat deze hetzelfde zijn als de dwarsprofielen in Figuur 4 en Figuur 5, met alleen een ander waterniveau t.o.v. N.A.P.

Kanaalpand model “Sluis Hengelo-sluis Delden”

In Sobek ziet het kanaalpand Hengelo-Delden er als volgt uit Figuur 12:



Figuur 12: Sobek model kanaalpand sluis Hengelo – sluis Delden

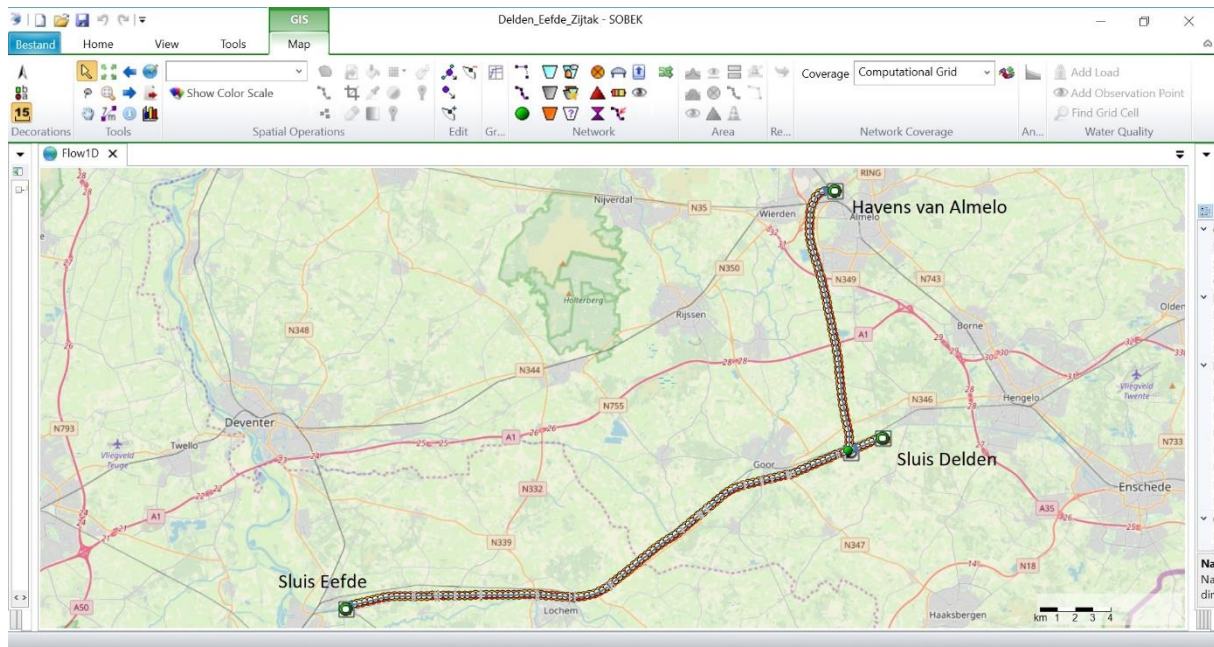
Ook hiervoor zijn de twee algemene dwarsprofielen voor damwanden en NVO's gebruikt.

Verder zijn de volgende verbredingen of versmallingen in het profiel toegevoegd aan het model:

- Boekelosebrug/spoorbrug (versmalling)
- Oelerbrug/haaksbergerstraat (versmalling)
- Zwaai kom Delden (verbreding)
- Vossenbrinkbrug (versmalling)
- St. annabrug (versmalling)

Kanaalpand model “Sluis Delden-sluis Eefde, inclusief de zijtak”

Dit kanaalpand is groter dan de andere kanaalpanden, maar omdat de waterstand t.o.v. NAP van zowel de zijtak als het hoofdkanaal van Delden naar Eefde gelijk is (+10 meter NAP), is hiervoor één model gemaakt, zoals te zien in Figuur 13.



Figuur 13: Sobek model kanaalpand Sluis Delden – sluis Eefde inclusief de zijtak

Hiervoor zijn drie algemene dwarsprofielen gebruikt: Een normaal en verbreed profiel van damwanden en een normaalprofiel NVO's. Het verbrede damwandprofiel is i.p.v. 50 meter breed, 60 meter breed. Dit profiel komt voor omdat er tijdens eerdere werkzaamheden een verbreding vanaf sluis Eefde is uitgevoerd. Deze verbreding loopt vanaf sluis Eefde tot ongeveer halverwege in de richting van sluis Delden.

De volgende verbredingen of versmallingen in het profiel zijn toegevoegd aan het model:

Hoofdkanaal

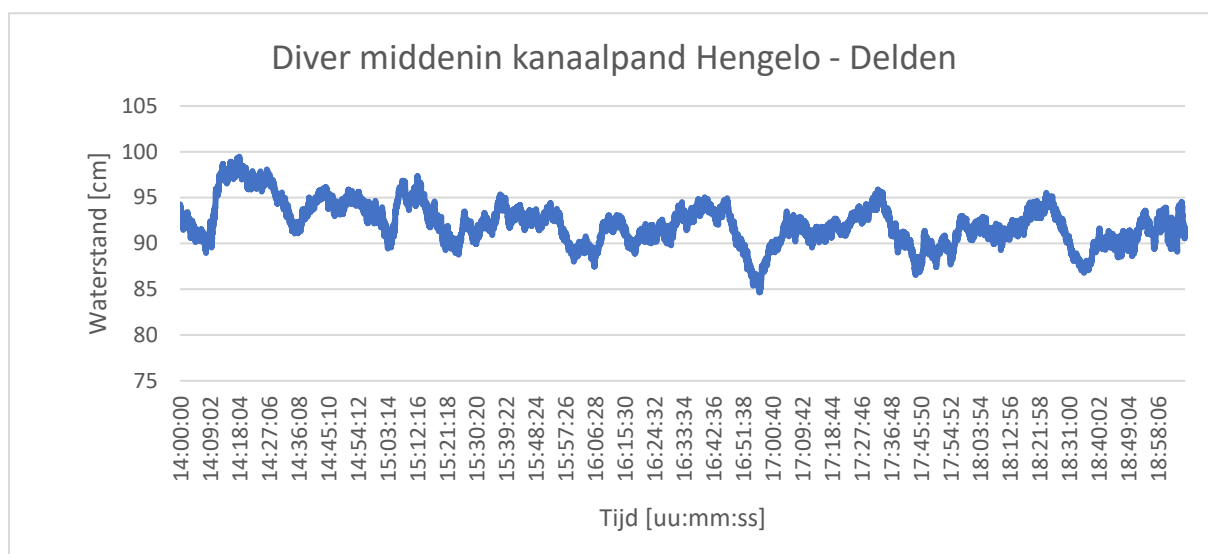
- Dorrebrug (versmalling)
- Hengelderbrug (versmalling)
- Weldammerbrug (versmalling)
- Diepenheimsedijk (versmalling)
- Brug met naam weg stationsweg (versmalling)
- (Oude) Zwaai kom net voor Lochem (verbreding)
- Brug met naam weg N346/stationsweg (versmalling)
- Verbreding bij de kade industrie in Lochem, breed damwand profiel
- Brug met naam weg dochterenseweg (versmalling)
- Oude Zwaai kom (verbreding)
- Brug met naam weg kapelweg (versmalling)

Zijtak

- Spoorbrug (Hengelo-Zutphen) (versmalling)
- Tankinkbrug (versmalling)

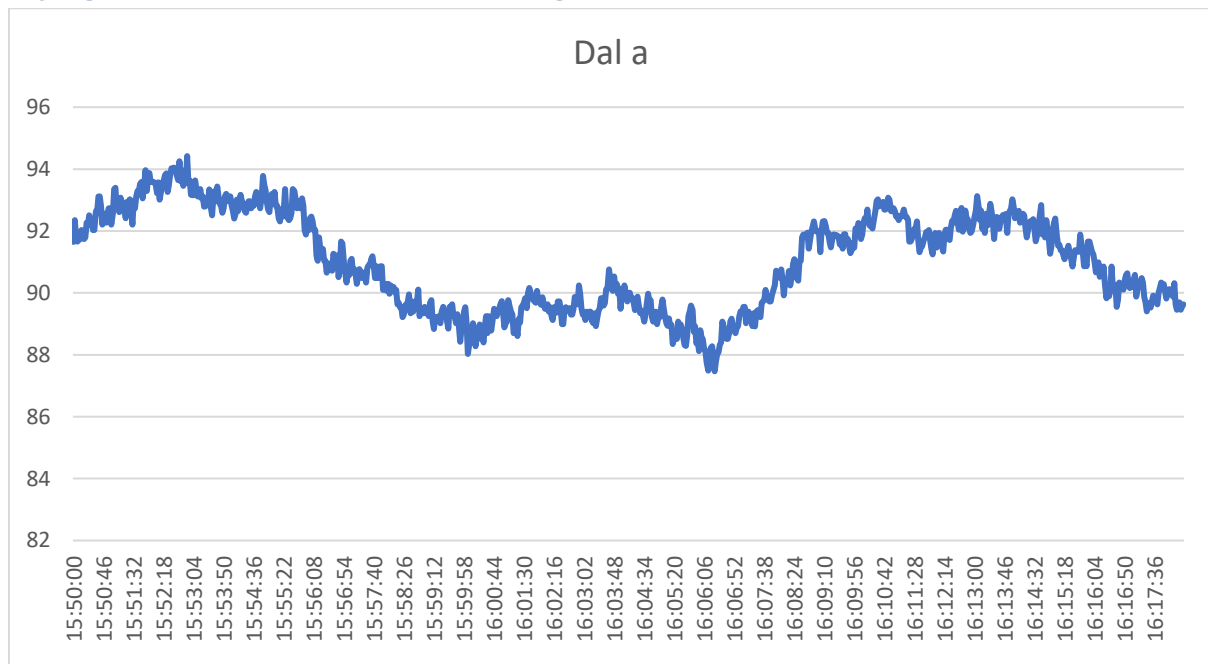
- Cotwicherbrug (versmalling)
- Warmtinkbrug (versmalling)
- Zwaaiikom Deldenerbroek (verbreding)
- Linschotbrug (versmalling)
- Vredesbrug (versmalling)
- Zwaaiikom Bornerbroek (verbreding)
- Hoeselderbrug (versmalling)
- Leemslagenbrug (versmalling)
- Zwaaiikom jachthaven Almelo (verbreding)
- Wierdensebrug (versmalling)
- Spoorbrug (Almelo-Deventer) (versmalling)
- Spoorbrug (Almelo-Vrienzenvveen) (versmalling)

Bijlage C – Waterniveau meting diver tussen sluis Hengelo en Delden



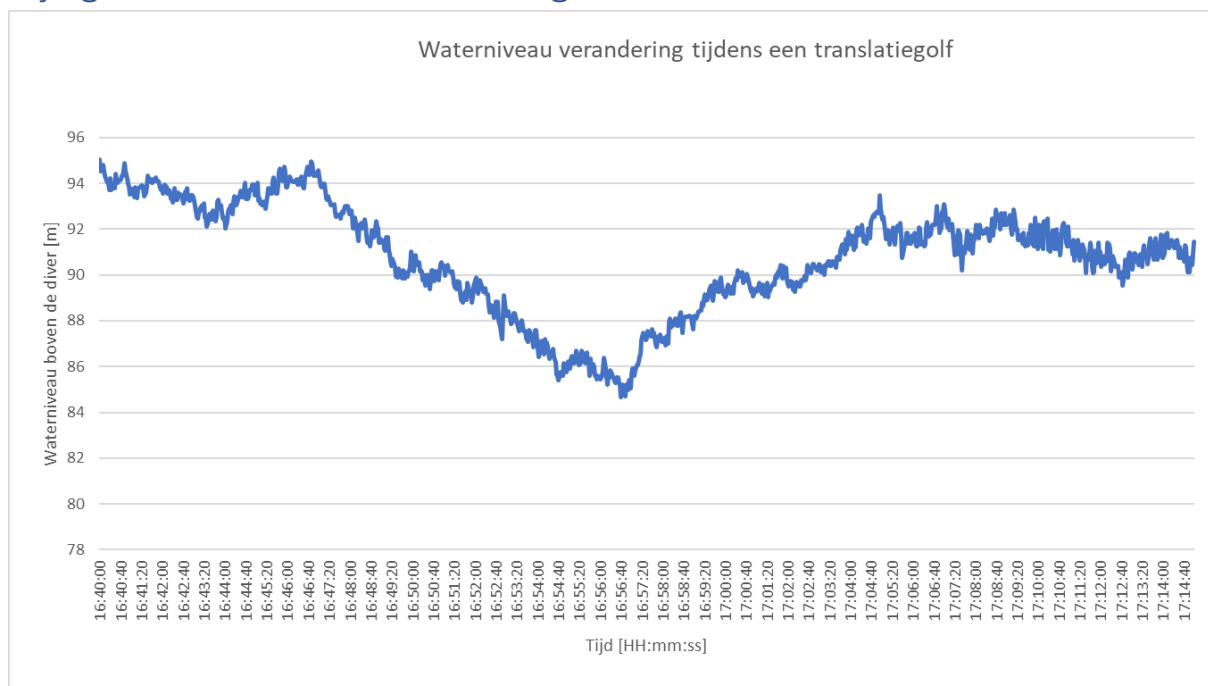
Figuur 14; waterniveau metingen gedurende de volledige meetperiode van de diver midden tussen sluis Hengelo en sluis Delden

Bijlage D1 – Waterniveau meting dal a



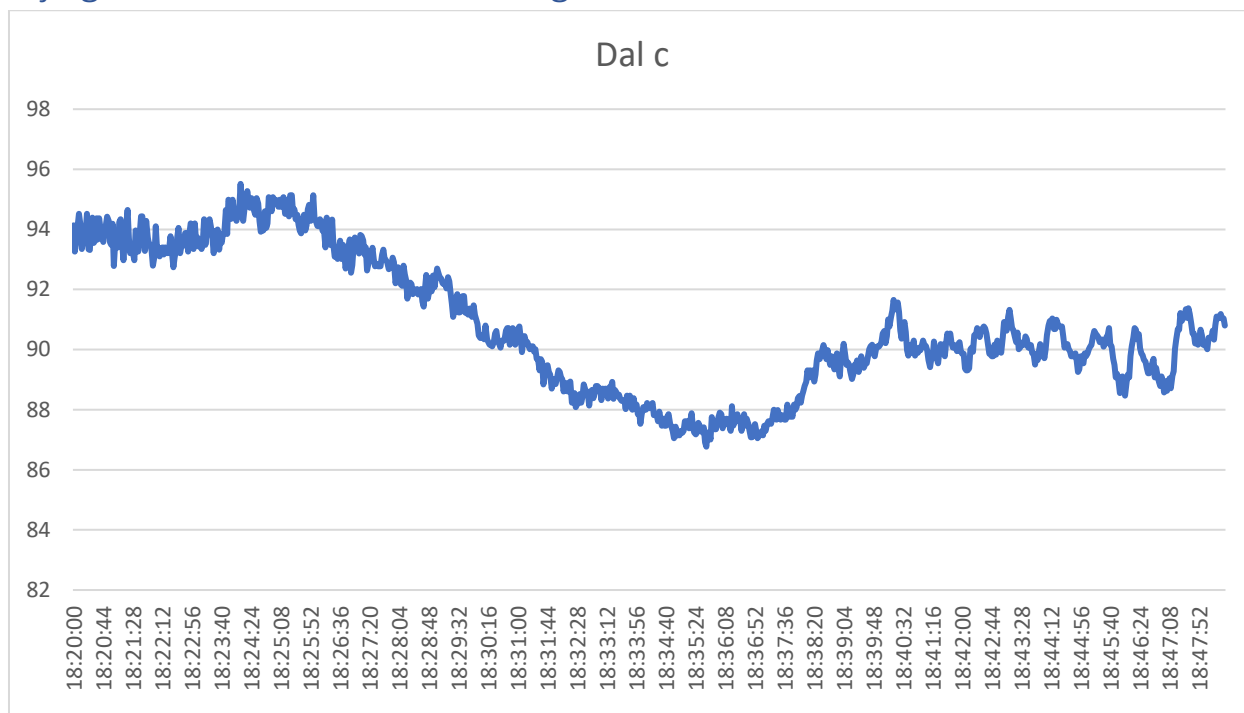
Figuur 15; waterstandsverandering tijdens een translatiegolf behorende bij dal a

Bijlage D2 – Waterniveau meting dal b



Figuur 16; waterstandsverandering tijdens een translatiegolf behorende bij dal b

Bijlage D3 – Waterniveau meting dal c



Figuur 17; waterstandsverandering tijdens een translatiegolf behorende bij dal c