

P. van Leeuwen, L. van Olst en B.H. van der Scheer

Bodembescherming met behulp van boomstammen

Bodembescherming met behulp van boomstammen

Door

P. van Leeuwen- 4277929
L. van Olst- 4247000
B.H. van der Scheer- 4220234

in gedeeltelijke vervulling van de vereisten van

Bachelor of Science
Civiele Techniek

Aan de Technische Universiteit Delft,

Supervisor:	Ir. H.J. Verhagen	TU Delft
	Ir. H.J. Verheij	TU Delft

Een digitale versie van deze thesis is beschikbaar op: <http://repository.tudelft.nl/>.

Voorwoord

Dit rapport is gemaakt in het kader van het Bachelor eindproject van de TU Delft. Het is het tweede rapport dat onderzoek doet naar de bodembescherming met behulp van boomstammen. Om binnen dit kader de uiteindelijke conclusies te kunnen trekken zijn er een aantal vereenvoudigingen en aannamen gedaan.

Aan de inhoud van dit rapport inclusief de bijlagen kunnen geen rechten worden ontleend, tenzij schriftelijk anders wordt overeengekomen. De TU Delft, begeleiders ir. H.J. Verhagen en ir. H.J. Verheij en de auteurs zijn niet verantwoordelijk voor eventuele fouten of consequenties van dit rapport. Niet alle bevindingen in dit rapport worden door de TU Delft onderschreven.

De auteurs zijn veel dank verschuldigd aan de begeleiders ir. H.J. Verhagen en ir. H.J. Verheij voor de hulp en waardevolle adviezen.

Samenvatting

Door menselijke ingrepen zoals versmalling en rechtekken van de rivier, winning van bouwstoffen en de bouw van waterwerken krijgen Nederlandse rivieren steeds minder zand en grind aangevoerd. De stroomsnelheid en daarmee de erosie nemen toe. Er ontstaan grote ontgrondingskuilen, die het risico op het bezwijken van de oever vergroten. Om dit erosieproces tegen te gaan wil Rijkswaterstaat bomen uit de uiterwaarden gaan gebruiken om de bodem mee te beschermen. Echter kunnen de bomen hinder opleveren voor de scheepvaart als ze in de schroef terecht komen. Om veiligheid te garanderen is informatie nodig over de kritieke stroomsnelheid van de boomstammen.

De hoofdvraag van dit onderzoek luidt: In hoeverre kunnen boomstammen toegepast worden als bodembescherming om erosie en ontgroning te voorkomen. Verschillende bomenconstructie worden op schaal getest aan de hand van experimenten in de laboratorium goten in Stevinlab III te Delft.

Per constructie wordt gekeken naar het bezwijkmechanisme, de kritieke stroomsnelheid en turbulentie. Ook wordt er onderzocht of de kritieke stroomsnelheid van boomstammen beschreven kan worden met formules op basis van Izbash en op basis van Shields. Uiteindelijk wordt het schaalmodel vertaald naar de werkelijkheid.

Uit dit onderzoek komt naar voren dat boomstammen kunnen worden toegepast om de bodem mee te beschermen op basis van de kritieke stroomsnelheid en de turbulentie. Het toepassen is echter niet op elke plek in de rivier mogelijk en er zal dus voor elke situatie gekeken moeten worden wat de maximale stroomsnelheid is in de rivier en welke constructie van boomstammen het best gebruikt kan worden.

Wat op valt is dat de bomenconstructies bestaande uit één laag de hoogste kritieke stroomsnelheid behalen maar een lage relatieve fluctuatie intensiteit. Voor de constructies met meer lagen is het omgekeerde het geval, de kritieke stroomsnelheid is lager maar de relatieve fluctuatie intensiteit is hoger.

Er wordt aangeraden om in een vervolgonderzoek de nauwkeurigheid te vergroten. Dit kan door te werken met een bredere stroomgoot, grotere boomstammen en betere snelheidsmeters.

Voor het gebruik van formules om de kritieke stroomsnelheid van boomstammen mee te beschrijven is verder onderzoek nodig. Uit dit onderzoek komt naar voren dat de formules nog niet correct zijn. Er zijn een aantal variabelen verwaarloosd wat deze fout veroorzaakt kan hebben.

Symbolenlijst

Symbol	Betekenis	Eenheid
A	Oppervlakte	m^2
C_i	Coëfficiënt	-
d	1. Dikte van de boomstam 2. Diameter	m m
d_n	Nominale diameter	m
F	Kracht	N
g	Gravitatieversnelling	m/s^2
k	Ruwheid bodem	m
k_i	Evenredigheidscoëfficiënt	-
L	Lengte van de boomstam	m
M	1. Massa boomstam 2. Moment	kg Nm
r	Relatieve fluctuatie intensiteit	-
u	Snelheid in x-richting	m/s
u'	Turbulente snelheid fluctuatie x-richting	m/s
u^*_c	Kritieke schuifsnelheid	m/s
u_c	Kritieke stroomsnelheid	m/s
V	Volume boomstam	m^3
v	Snelheid in y-richting	m/s
v'	Turbulente snelheid fluctuatie y-richting	m/s
w	Snelheid in z-richting	m/s
w'	Turbulente snelheid fluctuatie z-richting	m/s
Δ	Relatieve dichtheid	-
μ	Gemiddelde	Verschilt
ν	Kinematische viscositeit	m^2/s
ρ	Dichtheid	kg/m^3
ρ_s	Dichtheid boomstam	kg/m^3
ρ_w	Dichtheid water	kg/m^3
σ	Standaarddeviatie	Verschilt
ψ_c	Shields parameter	-

Inhoud

VOORWOORD	IV
SAMENVATTING	V
SYMBOLENLIJST	VI
1. INLEIDING	1
1.1 AANLEIDING TOT ONDERZOEK.....	1
1.2 DOELSTELLING	1
1.3 STRUCTUURBESCHRIJVING	2
2. THEORETISCHE ACHTERGROND	3
2.1 GEBIEDSOMSCHRIJVING	3
2.1.1 Stroomsnelheid.....	3
2.1.2 Ontgronding.....	4
2.2 EERDERE VERBANDEN VOOR BOOMSTAMMEN	5
2.2.1 Verbanden op basis van Izbash.....	5
2.2.2 Verbanden op basis van Shields	6
2.2.3 Turbulentie.....	6
2.3 OPSTELLINGEN UIT HET VERLEDEN	7
2.4 OPSTELLINGEN HUIDIG ONDERZOEK	9
2.4.1 Variatie A	9
2.4.2 Variatie B.....	10
2.4.3 Variatie C.....	11
2.4.4 Variatie D.....	12
2.4.5 Variatie E	12
2.4.6 Variatie F.....	13
2.5 OVERZICHT PROEFOPSTELLINGEN HUIDIG ONDERZOEK	14
3. MEETMETHODE	16
3.1 MATERIALEN	16
3.2 PROEFOPSTELLING	16
3.2.1 Constanten.....	16
3.2.2 Variabelen	17
3.3 MEETOPSTELLING	18
3.4 BEPALING KRITIEKE STROOMSNELHEID	18
4. UITVOERING	19
4.1 PROCEDURE.....	19
4.2 HERHALING PROEVEN	20
4.3 OVERIGE PROEVEN	20
4.4 SNELHEIDSPROFIEL	20
5. RESULTATEN	21
5.1 NAUWKEURIGHEID RESULTATEN.....	21
5.2 KRITIEKE STROOMSNELHEDEN	21

5.3	TURBULENTIE.....	24
5.4	FORMULE VOOR KRITIEKE STROOMSNELHEID BOOMSTAMMEN.....	25
5.4.1	Controle gevonden verbanden op basis van Izbash.....	26
5.5	STROMING DOOR CONSTRUCTIE CA1040*.....	28
6.	CONCLUSIE.....	29
6.1	BEZWIJKMECHANISME.....	29
6.1.1	Bezwijkmechanisme opstelling variatie A.....	29
6.1.2	Bezwijkmechanisme opstelling variatie B.....	29
6.1.3	Bezwijkmechanisme opstelling variatie C.....	29
6.1.4	Bezwijkmechanisme opstelling variatie D.....	29
6.1.5	Bezwijkmechanisme opstelling variatie E.....	30
6.1.6	Bezwijkmechanisme opstelling variatie F.....	30
6.2	KRITIEKE STROOMSNELHEID.....	30
6.2.1	Kritieke snelheid.....	30
6.2.2	Schommeling snelheid.....	31
6.3	TURBULENTIE.....	32
6.4	VERBANDEN VOOR BOOMSTAMMEN.....	32
6.4.1	Formule op basis van Izbash.....	32
6.4.2	Formule op basis van Shields.....	33
6.5	VERTALING NAAR DE WERKELIJKHEID.....	33
6.6	TOEPASSING VAN BOOMSTAMMEN ALS BODEMBESCHERMING.....	34
7.	DISCUSSIE & AANBEVELING.....	35
7.1	STROOMGOOT.....	35
7.2	METINGEN EMS.....	35
7.3	BODEM.....	36
7.4	BOOMSTAMMEN.....	36
7.5	STROOMGEBIED.....	36
7.6	TURBULENTIE.....	37
7.7	BENADERING KRITIEKE STROOMSNELHEID MET FORMULES.....	37
7.8	OVERIG VERVOLGONDERZOEK.....	37
8.	LITERATUUR.....	38
9.	BIJLAGE.....	39
	BIJLAGE 1: INFORMATIE STROMINGSGBIED.....	39
	BIJLAGE 2: FORMULE IZBASH ANDERE DOORSNEDE.....	43
	BIJLAGE 3: DICHTHEDEN BOOMSTAMMEN.....	44
	BIJLAGE 4: BEPALING RUWHEID ZAND.....	45
	BIJLAGE 5: UITVOERING PROEVEN.....	46
	BIJLAGE 6: NORMAALVERDELING.....	48
	BIJLAGE 7: RESULTATEN SNELHEDEN.....	49
	BIJLAGE 8: SNELHEIDSPROFIEL.....	66
	BIJLAGE 9: BEZWIJKMECHANISMEN.....	69

1. Inleiding

1.1 Aanleiding tot onderzoek

Deze tekst is eerder in gewijzigde vorm verschenen in 'Bodembescherming met behulp van boomstammen', van C. Çete & S. Haage (2016).

Door menselijke ingrepen zoals versmalling en rechtekken van de rivier, winning van bouwstoffen en de bouw van waterwerken krijgen Nederlandse rivieren steeds minder zand en grind aangevoerd. De stroomsnelheid en daarmee de erosie nemen toe met als gevolg een daling van de rivierbodem wat gepaard gaat met een daling van de waterstand. Plaatselijk wordt de rivier hierdoor dieper, echter in de buurt van sluizen en andere harde ondergronden blijft de bodem van de rivier constant. Op deze plekken ontstaan ondieptes die bij laagwater de scheepvaart kunnen hinderen. Ook ontstaan door de erosie grote ontgrondingskuilen die het risico op het bezwijken van de oever vergroten. (Rijkswaterstaat, 2013)

Er zijn verschillende mogelijkheden aanwezig om het erosieproces tegen te gaan. Bijvoorbeeld door het storten van sediment op de bodem. Voor deze processen moeten echter materialen toegevoerd worden, wat de nodige kosten met zich meebrengt. Daarom wil Rijkswaterstaat bomen uit de uiterwaarden gaan neerleggen op de bodem om verdere erosie te voorkomen. Deze worden gekapt en afgezonken voor een bepaalde tijd zodat ze niet opdrijven na plaatsing. Het gebruik van bomen heeft als bijkomend effect dat het zorgt voor de toename van inheemse vissoorten en flora die zich afzet tegen het hout. Met als resultaat een verbetering van milieu- en waterkwaliteit. (Rijkswaterstaat, 2016)

Andere partijen binnen Rijkswaterstaat vinden het echter niet vanzelfsprekend om bomen te gebruiken. De bomen kunnen hinder opleveren voor de scheepvaart als ze in de schroef terecht komen. Om veiligheid te garanderen is informatie nodig over de kritieke stroomsnelheid van de boomstammen.

Bij stenen kan de kritieke stroomsnelheid bepaald worden met de formule van Shields of met de formule van Izbash. Door de afwijkende vorm en porositeit van boomstammen kan niet dezelfde formule gebruikt worden. In het onderzoek van C. Çete en S. Haage (2016) is de formule van Shields en van Izbash omgeschreven naar een formule die wel toepasbaar is op boomstammen. In deze formules staan een aantal onbekenden, om die te kunnen bepalen is verder experimenteel onderzoek nodig. Zo wordt er nog meer informatie verkregen over de kritieke stroomsnelheid van boomstammen bij het gebruik als bodembescherming.

1.2 Doelstelling

Dit onderzoek is een vervolg op het onderzoek van C. Çete en S. Haage (2016). Het doel is om te onderzoeken of het mogelijk is om boomstammen toe te passen als bodembescherming in rivieren. De hoofdvraag luidt: In hoeverre kunnen boomstammen toegepast worden als bodembescherming om erosie en ontgroning te voorkomen.

De hoofdvraag is opgesplitst in meerdere deelvragen:

- * Hoe bezwijkt een constructie?
- * Wat is de kritieke stroomsnelheid bij verschillende opstellingen?
- * Wat is de invloed van de verschillende schaalmodellen op de turbulentie?
- * Zijn er duidelijke verbanden te vinden die met een formule beschreven kunnen worden?
- * Hoe gedraagt een schaalmodel zich in de werkelijkheid?

Op basis van experimenteel onderzoek zal een advies uitgebracht worden over de toepasbaarheid van boomstammen. De experimenten zullen beperkt worden tot proeven in een kleine laboratoriumgoot.

1.3 Structuurbeschrijving

In hoofdstuk 2 van dit rapport wordt de theoretische achtergrond van dit onderzoek beschreven. Eerst volgt een omschrijving van het gebied waar de boomstammen eventueel geplaatst gaan worden, daarna worden de verbanden om de kritieke stroomsnelheid van bomen mee te bepalen toegelicht. Uiteindelijk wordt een overzicht gegeven van de opstellingen uit het verleden, waarna op basis hiervan de huidige opstellingen worden besproken.

In hoofdstuk 3 en 4 worden respectievelijk de meetmethode en de uitvoering beschreven met daarbij een overzicht van de gebruikte apparatuur, de materialen en de variabele en constanten van de opstelling.

De resultaten die verkregen zijn worden in hoofdstuk 5 getoond. Eerst volgt een tabel met de kritieke stroomsnelheden per constructie, daarna is een overzicht te zien van de turbulentie per constructie. Uiteindelijk is van één constructie het stromingsprofiel weergegeven.

De conclusie in hoofdstuk 6 wordt per deelvraag gegeven. Op basis van de beantwoording van alle deelvragen wordt de hoofdvraag beantwoord. In hoofdstuk 7 is te lezen wat de kanttekeningen zijn en wat wordt aanbevolen om in vervolgonderzoeken te verbeteren en rekening mee te houden.

Dit rapport is geschikt voor iedereen die interesse heeft in het beschermen van de rivierbodem met behulp van boomstammen. Dit onderzoek is een vervolgonderzoek op het onderzoek van C. Çete en S. Haage (2016), voor de benodigde voorkennis wordt dan ook verwezen naar dit eerdere rapport.

2. Theoretische achtergrond

2.1 Gebiedsomschrijving

Om te kunnen onderzoeken of bomen toepasbaar zijn als bodembescherming is meer informatie nodig over het gebied en de omstandigheden waaronder de bomen geplaatst zullen worden. Rijkswaterstaat geeft aan ontgrondingskuilen te hebben in de Lek, Spui, Oude Maas, Dordtsche Kil en Beneden Merwede (Sieben, 2016). De omstandigheden in deze rivieren zijn grotendeels afhankelijk van twee factoren: het getij en het debiet in de Rijn (Rijkswaterstaat, 2004). In Bijlage 1: Informatie stromingsgebied, is een overzicht van het stroomgebied gegeven.

Het getij zorgt in het westelijk deel van de Rijn-Maasmonding voor kentering (o.a. in de Dordtsche Kil en de Spui). Afhankelijk van het debiet van de Rijn is de grootte van dit effect merkbaar. In het oostelijk deel overheerst de rivierafvoer en treedt helemaal geen kentering op. Bij lage afvoeren van de Rijn zijn de Haringvliet-sluizen gesloten en stroomt het grootste deel via de Nieuwe-Waterweg. Hierbij is de stroming in de Dordtsche Kil en het Spui noordwaarts gericht. Als het debiet van de Rijn toeneemt stroomt er steeds meer water via de Haringvlietsluizen. Dit brengt een kantelpunt met zich mee waarop de stroming in de Dordtsche Kil en het Spui zich omdraait (Rijkswaterstaat, 2004). Door deze twee oorzaken kan de stroomrichting zich omdraaien, waardoor het van belang is dat de bomenconstructies in beide richtingen een gunstig effect hebben op de stroming.

Bij lage afvoeren van de Rijn speelt verzilting ook een rol, tijdens een waterstandsverhoging op zee is dit merkbaar tot diep in het stroomgebied (Rijkswaterstaat, 2004), zie Bijlage 1: Informatie stromingsgebied. Dit kan invloed hebben op de stabiliteit van de boomstamconstructie doordat de dichtheid van zoutwater hoger is dan de dichtheid van zoetwater.

2.1.1 Stroomsnelheid

De belangrijkste parameter voor dit onderzoek is de stroomsnelheid in het stroomgebied. 'De grootte van de maximale stroomsnelheden wordt bepaald door de grootte van de afvoer van de Rijn, het direct daaraan gekoppelde lozingsprogramma van de Haringvlietsluizen en het getijverloop op zee.' (Rijkswaterstaat, 2004).

De maximale vloed- en ebstroom van de Noord en Beneden Merwede wordt verkregen door het maximaal debiet dat hierdoorheen stroomt te delen door het oppervlak. Het oppervlak bestaat uit de breedte maal de diepte. Deze diepte is onder andere afhankelijk van het getij en varieert in:

- * Dordrecht (knooppunt Noord, Beneden-Merwede en Oude Maas) van +5 cm NAP tot +90 cm NAP
- * Spijkenisse (Oude Maas) van -30 cm NAP tot +100 cm NAP,
- * Bernisse Zuidland (het Spui) van 15 cm NAP tot +55 cm NAP

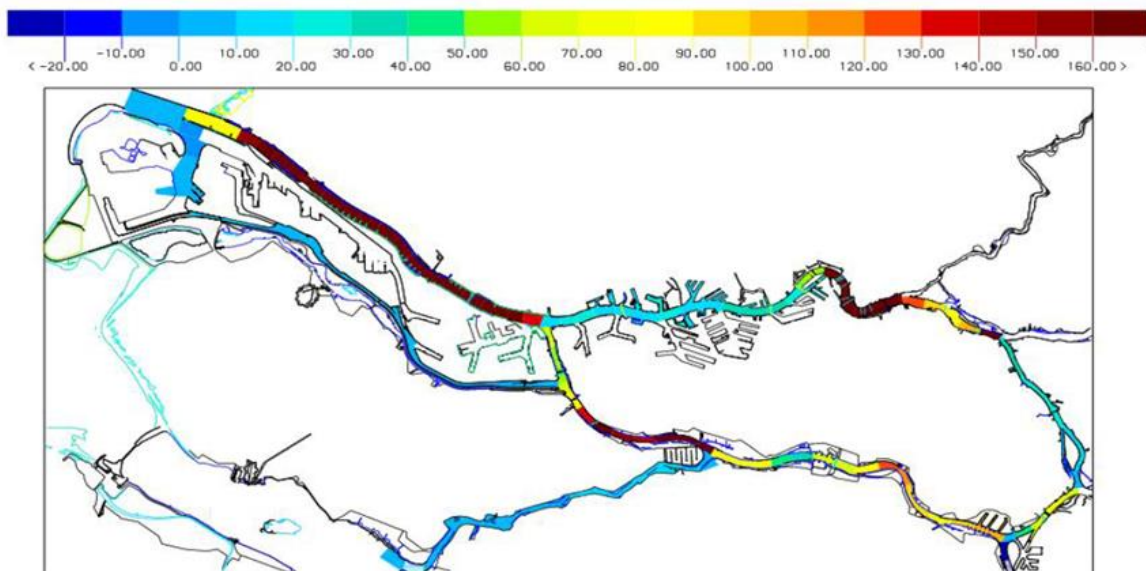
Voor de Dordtsche Kil wordt de variatie ter hoogte van Dordrecht aangenomen. (Rijkswaterstaat, 2016) De maatgevende stroomsnelheden zijn weergegeven in Tabel 2.1, in Bijlage 1: Informatie stromingsgebied zijn de stroomsnelheden, dieptes en breedtes gegeven waarop deze data is gebaseerd.

Tabel 2.1: Maatgevende snelheid vloed- en ebstroom stroomgebied

		Maximale vloedstroom (m/s)	Maximale ebstroom (m/s)
Splitsingspunt/Station	Rivier		
Werkendam	Beneden-Merwede	0.42	1.12
Dordrecht (oost)	Noord	1.24	1.04
's Gravendeel	Dordtsche Kil	1.03	0.71
Beerenplaat	Oude Maas	1.31	1.34
Beerenplaat	Spui	1.15	1.03
Schoonhoven	Lek	0.41	1.11

2.1.2 Ontgroning

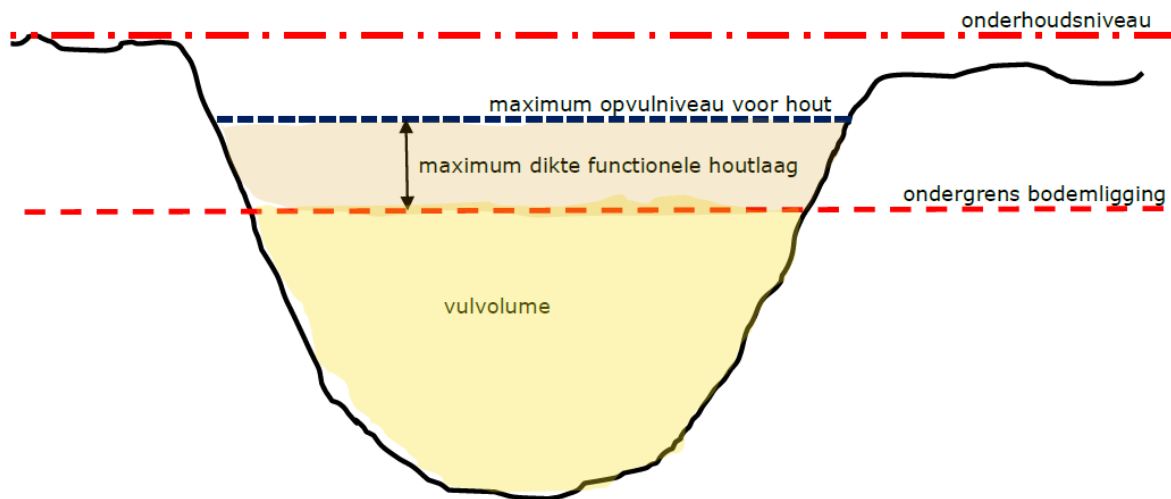
In dit hoofdstuk zal het specifieke probleem van de ontgrondingskuilen worden beschreven, hierbij wordt ingezoomd op de Oude Maas. In Figuur 2.1 is een overzicht van het stroomgebied gegeven. In dit figuur is te zien waar in de rivier hoge dan wel lage stroomsnelheden optreden. In de legenda is de transportcapaciteit te zien welke evenredig is met de stroomsnelheid tot de macht vijf. De stroomsnelheid is van belang omdat dit een van de belangrijkste parameters is voor ontgroning samen met de korrelgrootte, het soortelijk gewicht en de cohesie. De laatstgenoemde parameters hangen af van het materiaalsoort. (Rijkswaterstaat, 2016).



Figuur 2.1: Transportcapaciteit bij de huidige situatie: normaal getij en hoge rivier afvoer (Sieben, 2016)

Zoals in Figuur 2.1 te zien is zijn niet alle delen van de het stroomgebied aangetast. Dit komt omdat de bodem van de rivieren niet overal gelijk is. Vroeger bestond de bodem van de Oude Maas (en de rest van het stroomgebied) uit veen. Deze veenlaag beschermde de grondlagen eronder, ook was de bodem van de rivier relatief vlak. Door de scheepvaart was het noodzakelijk om de rivieren te verdiepen, dit is op sommige plaatsen ten kosten gegaan van de veenlaag met als gevolg het ontstaan van ontgrondingskuilen. De uitgegraven diepte van de rivier was -9.45 m NAP (Rijkswaterstaat, 2016) in Bijlage 1: Informatie stromingsgebied, is het diepteprofiel van de Oude Maas getoond en is goed te zien dat op veel plekken een veel grotere diepte wordt behaald, sommige ontgrondingskuilen halen een diepte van -19 m NAP (Sieben, 2016). De oeverwanden zijn zo dicht op de vaargeul gebouwd, dat de stabiliteit hiervan in het geding komt als de kuilen blijven groeien.

De doorsnede van een kuil is gegeven in Figuur 2.2. Hierin is het onderhoudsniveau de hoogste ligging die het rivierbed mag hebben ten behoeve van de scheepvaart. De ondergrens is het laagste punt waarbij de bodemligging nog zorgt voor stabiliteit van de oeverwanden.



Figuur 2.2: Doorsnede ontgrondingskuil (Sieben, 2016)

Om ervoor te zorgen dat de stabiliteit van de oeverwanden niet in gevaar komt moet er wat aan deze ontgrondingskuilen gedaan worden. Er zijn meerdere mogelijkheden om deze op te vullen. Een van de manieren is het storten van sediment. Dit is echter een tijdelijke oplossing en zou herhaald moeten worden omdat het storten van sediment de ontgroning niet stopt. Een andere manier is het bekleden van de oever en de kuilen. Deze manier zou over de volledige lengte van het stromingsgebied toegepast moeten worden, dat is duur en bovendien niet mooi. (Rijkswaterstaat, 2016 & Sieben, 2016).

Daarom wilt Rijkswaterstaat weten of het mogelijk is om de kuilen op te vullen met sediment waar bovenop hout komt te liggen. Dit hout zou uitspoeling van het sediment moeten voorkomen en heeft als positief bijeffect dat het uiteindelijk een nieuwe veenlaag oplevert. Er moet genoeg hout worden opgeslagen zodat de kuilen in één keer te vullen zijn nadat het sediment gestort is. Daarom wordt gedacht om een gebied van 300 x 1200 m² in de Haringvliet te gebruiken om hout op te slaan. Het desbetreffende hout kan vanuit Staatsbosbeheer en het onderhoud van de uiterwaarden komen. Het hout wordt in het water geplaatst voor een bepaalde tijd zodat het zich volzuigt met water. Hierdoor wordt het zwaarder dan water en blijft het op de bodem liggen. Terwijl het hout zich volzuigt is het een goede bescherming voor vissen, die zich er kunnen verschuilen. Ook wordt verwacht dat de bomen een positief impuls geven aan de flora in dat gebied.

2.2 Eerdere verbanden voor boomstammen

De kritieke stroomsnelheid kan benaderd worden met verbanden gebaseerd op Izbash en met verbanden gebaseerd op Shields. In dit hoofdstuk worden de verbanden verder toegelicht.

2.2.1 Verbanden op basis van Izbash

Izbash (1930) heeft een formule opgesteld om de kritieke stroomsnelheid te kunnen bepalen bij stenen. De Izbash benadering kan toegepast worden bij een non-uniform/turbulente stroming over een (bijna) horizontale bodem. De snelheid in de formule van Izbash is de snelheid werkende op de steen, de plaats van de snelheid is echter niet gedefinieerd maar wordt zo dicht mogelijk bij de bodem genomen. (Schiereck, 1993)

De Izbash benadering is gebaseerd op het krachtenevenwicht bestaande uit actieve krachten (sleepkracht, schuifkracht en liftkracht) en passieve krachten (gewicht en wrijvingskracht). Beweging van de stenen vindt plaats indien de actieve krachten groter zijn dan de passieve.

C. Çete en S. Haage (2016) hebben de Izbash benadering uitgevoerd op boomstammen. Waarbij een formule voor de kritieke stroomsnelheid bij vierkante boomstammen loodrecht op de stroomrichting en parallel op de stroomrichting is afgeleid, zie vergelijking (2.1) en (2.2).

$$u_{c\perp}^2 = \Delta \frac{gdL}{k_1L + k_2d} \quad (2.1)$$

$$u_{c//}^2 = \Delta \frac{gdL^2}{k_1d^2 + k_2dL + k_3L^2} \quad (2.2)$$

Deze vergelijkingen gelden ook voor boomstammen met een andere doorsnede dan een vierkante doorsnede. De vormverandering zorgt dan wel voor een verandering van de constante in de vergelijking, zie Bijlage 2: Formule Izbash andere doorsnede.

2.2.2 Verbanden op basis van Shields

De benadering van Shields (1936) kan gebruikt worden bij een uniforme stroming. Is de stroming bijna uniform dan kan een correctiefactor gebruikt worden. Wijkt de stroming echter teveel af dan klopt deze benadering niet meer. (Schiereck, 1993)

De vergelijking van Shields geeft een relatie tussen de dimensie loze schuifspanning en het Reynoldsgetal. Bij de Shields benadering wordt de schuifspanning als actieve kracht beschouwd (dat is niet helemaal juist, maar in praktijk is het verschil verwaarloosbaar). (Schiereck, 1993).

C. Çete en S. Haage (2016) hebben de Shields benadering herschreven voor boomstammen loodrecht en parallel op de stroomrichting. Hierbij is bij beide rotaties hetzelfde verband gevonden, zie vergelijking 2.3.

$$\psi_{c\perp\&//} = f(Re^*) = f\left(\frac{u_*c d}{\nu}\right) \quad (2.3)$$

2.2.3 Turbulentie

Om de het moment van bezwijken bij een bepaalde stroomsnelheid nog nauwkeuriger te bepalen moet ook de turbulentie worden meegenomen. De turbulentie kan met formule (2.4) beschreven worden. (Schiereck, 1993).

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}), \quad r_u = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{\bar{u}}, \quad r_v = \frac{\sqrt{\overline{v'^2}}}{\bar{v}}, \quad r_w = \frac{\sqrt{\overline{w'^2}}}{\bar{w}} \quad (2.4)$$

Hierin staat r_u voor relatieve fluctuatie intensiteit. Hoe groter r , hoe groter de turbulentie in dat vlak is. In dit onderzoek wordt enkel naar de snelheden parallel aan de stroomrichting van de stroomgoot gekeken, dit is r_u . Er wordt vanuit gegaan dat dit de overheersende turbulentie is.

Om Shields en Izbash beter te kunnen benaderen moeten in die formules de snelheid worden opgedeeld in gemiddelde snelheid \bar{u} en de turbulentie r_u .

$$u = \bar{u} + r_u \bar{u} \quad (2.5)$$

2.3 Opstellingen uit het verleden

Eerder onderzoek naar de bodembescherming met behulp van boomstammen is in 2016 uitgevoerd door C. Çete en S. Haage (2016). Zij hebben de kritieke stroomsnelheid bepaald voor verschillende soorten opstellingen. Ze varieerden in het aantal lagen, oriëntatie, verbindingen, vorm en de aanwezigheid van takken. In hoofdstuk 2.3 worden eerst de verschillende opstellingen van C. Çete en S. Haage (2016) besproken. Op basis van de conclusies die zij getrokken hebben, worden nieuwe proefopstellingen bedacht.

Tabel 2.2: Overzicht opstellingen uit onderzoek van C. Çete en S. Haage (2016)

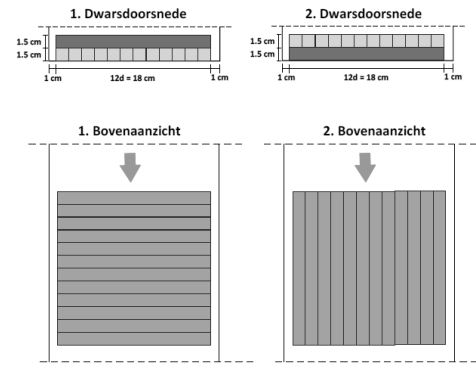
Beschrijving	Conclusie onderzoek 2016	Wat wordt meegenomen in het vervolg onderzoek	Afbeelding ¹
Vijf vierkante bomen zonder takken worden tegen elkaar aangelegd parallel aan de stroomrichting. De boomstammen worden vervolgens gestapeld.	Hoe lager de constructie hoe hoger de gevonden kritieke stroomsnelheid.	Bij hogere stapelconstructie moet er een manier bedacht worden, zodat de constructie toch nog effectief kan zijn (bijvoorbeeld door het gebruik van verbindingen).	
Vijf vierkante bomen zonder takken worden steeds iets gedraaid ten opzichte van de stroomrichting.	De constructie evenwijdig aan de stroomrichting heeft de hoogste kritieke stroomsnelheid.	Bij het plaatsen van boomstammen, worden de boomstammen zoveel mogelijk evenwijdig aan de stroomrichting geplaatst.	
Bij vijf vierkante bomen zonder takken wordt de invloed van verbindingen onderzocht.	Het toepassen van verbindingen zorgt voor een hogere kritieke stroomsnelheid, deze reductie is echter klein.	Verbindingen worden niet gebruikt bij enkellaagse constructies.	
De invloed van de doorsnede wordt getest door steeds vijf bomen parallel aan de stroomrichting te plaatsen. De vorm en het gebruik van wel of geen takken varieert hierin.	De vierkante doorsnede levert de hoogste kritieke stroomsnelheid op. Met takken is dit de ovaalvormige doorsnede (B2)	Vermoedelijk wordt de hoge kritieke snelheid van de vierkante doorsnede veroorzaakt doordat de bomen tegen elkaar aan geplaatst zijn. In werkelijkheid is dit niet het geval bij boomstammen door de vorm en de aanwezigheid van takken.	
Twintig vierkante bomen zonder takken worden op verschillende manieren gestapeld.	Niet getest.	De piramide vorm wordt meegenomen in het vervolg onderzoek. Verder worden meerdere constructies bedacht.	

¹ Afbeeldingen in het grijs zijn bedacht door C. Çete en S. Haage (2016) en de blauwe afbeeldingen zijn ook uitgevoerd.

Twaalf vierkante bomen zonder takken worden loodrecht op elkaar gestapeld.

Niet getest

Eén laag komt voor in de minst gunstige positie loodrecht aan de stroomrichting. Wat gebeurt er als de constructie 45 graden wordt gedraaid en geen enkele boomstam evenwijdig dan wel loodrecht aan de stroomrichting gelegen is.



Positieve resultaten zijn gecombineerd waardoor een proef ontstond met vijf ovaalvormige bomen met takken aan elkaar vastgebonden met touw.

De stroomsnelheden waren niet hoger dan de positieve resultaten individueel.

Het combineren van positieve effecten leidt niet per se tot een hogere kritieke stroomsnelheid.

2.4 Opstellingen huidig onderzoek

2.4.1 Variatie A

In de opstelling in Figuur 2.3 is gekozen om 5 boomstammen parallel op de stroomrichting te testen. Deze richting levert de hoogste kritieke stroomsnelheid op (Çete & Haage, 2016). In deze opstelling wordt gevarieerd met de bodemruwheid, aanwezigheid van takken en de vorm.

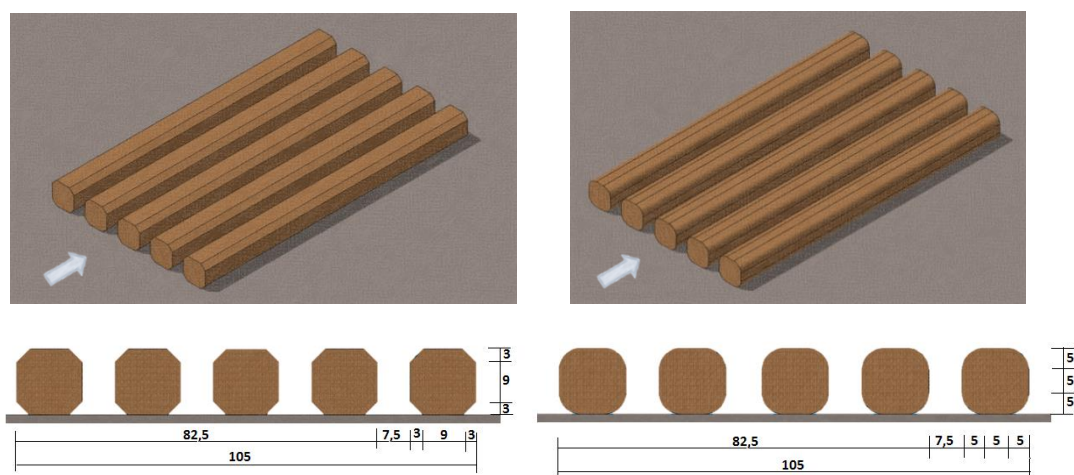
De bodemruwheid wordt gevarieerd om te zien wat de invloed is op de constante in de formule van Izbash en de formule van Shields voor boomstammen. Er wordt getest op twee bodemprofielen: één met grof zand en de ander met fijn zand.

De stroming in het schaalmodel van de boomstammen wordt beschreven met de Saint Venant vergelijking, die is gebaseerd op het behoud van massa en impuls. De laatste term in de vergelijking, gAS_f , geeft de bijdrage van de wrijving weer. De stroming verliest dus energie ten gevolge van de wrijving aan de bodem. Hoe ruwer de bodem hoe groter het energieverlies. De verwachting is dan ook hoe fijner de bodem hoe lager de kritieke stroomsnelheid zal zijn. (Hoitink, 2011).

Het onderzoek van C. Çete en S. Haage (2016) maakt gebruik van een hele ruwe bodem, wat voor een hoge kritieke stroomsnelheid zou moeten zorgen. Echter de bodem is zo ruw (gemiddelde steen diameter bodem bedraagt 1.13 cm terwijl de boomdiameter 1.5 cm bedraagt) dat er turbulentie tussen de stenen ontstaat die de bomen mogelijk omhoogstuwt, wat de kritieke stroomsnelheid negatief beïnvloedt (Visser, 1988).

De bomen worden iets uit elkaar geplaatst in tegenstelling tot het onderzoek van C. Çete en S. Haage (2016) die de bomen tegen elkaar aan geplaatst hebben. In principe geldt dat hoe verder de bomen uit elkaar geplaatst worden hoe meer turbulentie er tussen de bomen zal ontstaan (Visser, 1988). Toch is dit een belangrijk effect wat niet buiten beschouwing gelaten kan worden, aangezien in de praktijk de bomen altijd iets uit elkaar geplaatst worden door de vorm en de takken.

In het schaalmodel wordt getest met ovaalvormige en rondhoekige boomstammen. Deze bomen zijn representatief voor bomen in de praktijk die ook een ronde vorm hebben.



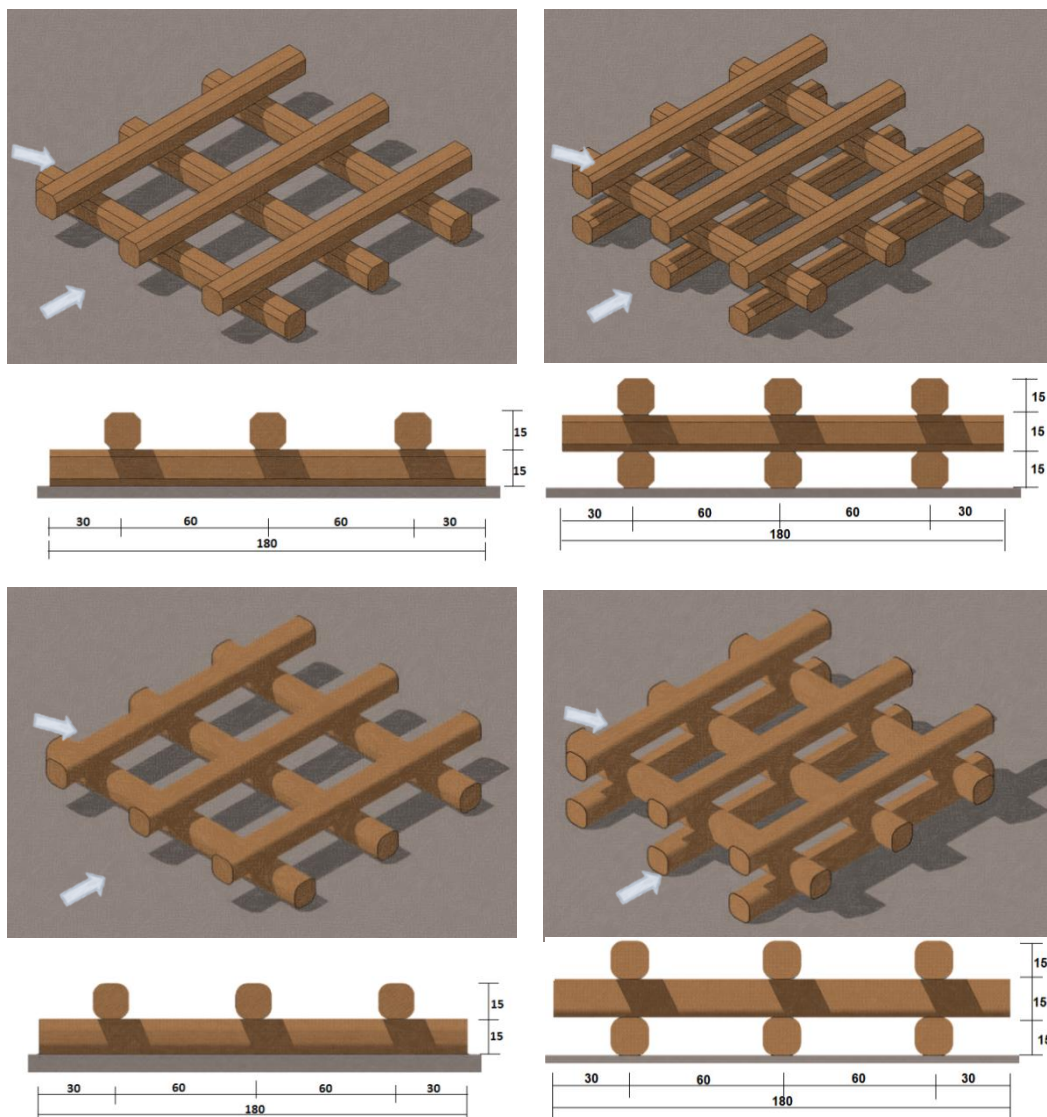
Figuur 2.3: Variatie A, met bodemruwheid, wel of geen takken en vorm als variabelen

2.4.2 Variatie B

In Figuur 2.4 is variatie B te zien, hier is gekozen om te variëren in stapelhoogte, rotatie, wel of geen takken en vorm. De bodemruwheid blijft in tegenstelling tot de voorgaande proef constant. Er is gekozen om te werken met de grove zandbodem.

Volgens de mengweg-hypothese van Prandtl (Schlichting, 1968) is er een logaritmisch snelheidsprofiel over de diepte. Dit betekent dat de stroomsnelheid groter is bij het wateroppervlak. Een hogere bomenconstructie is dus ongunstig ten aanzien van de stroomsnelheid. Door het toepassen van verbindingen kan er eventueel wel een hogere kritieke stroomsnelheid behaald worden. Omdat de bovenste laag boomstammen een hogere stroomsnelheid te verduren krijgt wordt de stapeling zo neergezet dat de bovenste rij boomstammen parallel liggen aan de stroming. Deze opstelling zorgt voor een lagere horizontale kracht op de constructie waardoor de kritieke stroomsnelheid voor het bezwijken groter is.

De constructie wordt ook 45 graden gedraaid, in dit geval staat geen enkele boomstam loodrecht dan wel parallel op de stroming. Staat de boomstam loodrecht op de stroming dan zorgt dit voor een lage kritieke stroomsnelheid (Çete & Haage, 2016).



Figuur 2.4: Variatie B, met stapelhoogte, rotatie, wel of geen takken en vorm als variabelen

2.4.3 Variatie C

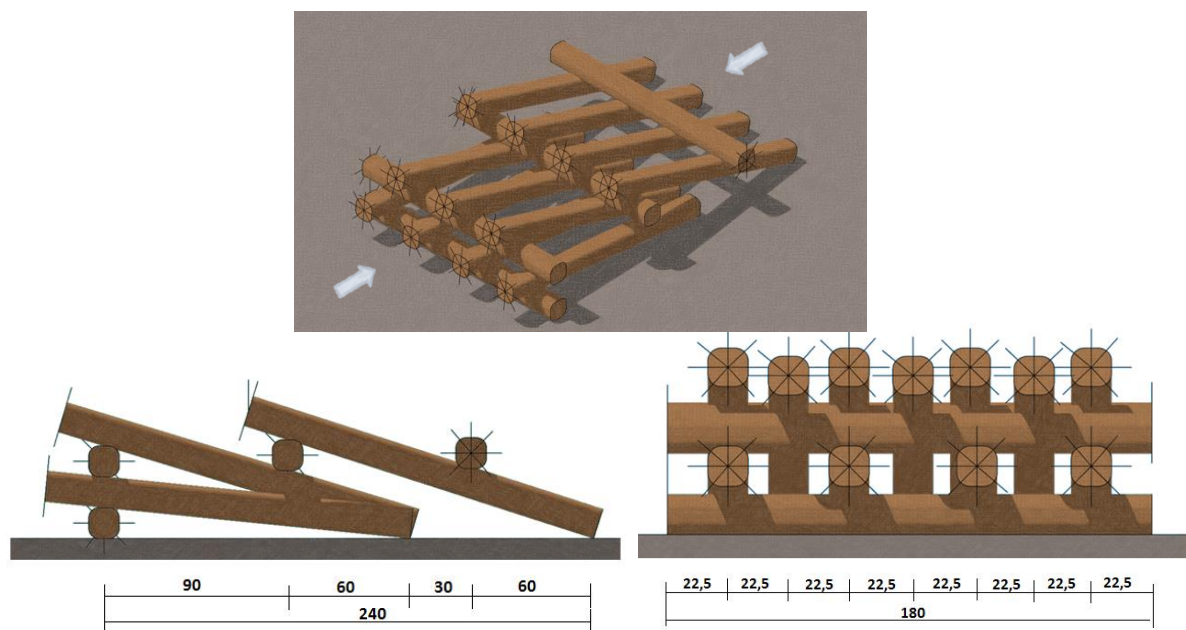
De constructie in Figuur 2.5 is een 'Impermeable deflector jams (DFJs)', bedacht en uitgevoerd door Andrew, P. (2006). Deze constructie is al enkele malen uitgevoerd in Australië en zorgt voor:

- * Een alternatief voor rots bekleding om erosie te voorkomen
- * Hoge kwaliteit van vis habitat
- * Energieverlies en geeft de stroom een andere richting
- * Substraat voor biofilms
- * Toename sediment opslag

Deze constructie is geschikt gebleken voor het gebruik om erosie en ontgronding te voorkomen. In het onderzoek van Andrew et al. (2006) is echter niet de kritieke stroomsnelheid bepaald. Ook wordt de constructie begraven in het zand. Met de opstelling in Figuur 2.5 wordt gekeken wat de kritieke stroomsnelheid van de constructie is, als deze niet is ingegraven in zand maar wordt neergezet op een grove zandbodem.

De boomstammen worden zoveel mogelijk in hun natuurlijke vorm getest, daarom met takken. Ook wordt de invloed van de wortels onderzocht. De wortels worden gemodelleerd met behulp van gaas, deze worden aan één uiteinde van de boomstammen bevestigd.

In het uiteinde van de rivier waar eventueel de bodem beschermt gaat worden met behulp van boomstammen vindt kentering plaatst. Daarom is het ook noodzakelijk om de kritieke stroomsnelheid te bepalen als de constructie 180 graden gerooteerd wordt.

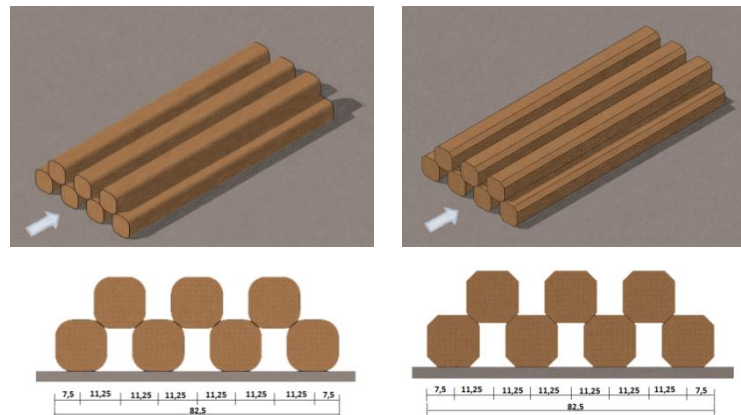


Figuur 2.5: Variatie C, Impermeable Deflector Jams

2.4.4 Variatie D

In Figuur 2.6 is de piramide opstelling te zien. Er liggen hier vier bomen naast elkaar met daarop nog drie bomen. Deze opstelling wordt getest omdat er verwacht wordt dat hij goed gebruikt kan worden in de werkelijkheid. Dit omdat alle bomen parallel aan de stroomrichting gelegen zijn en er geen verbindingen nodig zijn. Dit is waarschijnlijk een goedkope manier van toepassen. Vermoeden bestaat dat deze constructie stevig is door de samenwerking van de stammen en de relatief compacte opstelling.

Ook hier wordt gewerkt met de ruwe zandbodem en wordt er gevarieerd in de doorsnedevorm van bomen en de aanwezigheid van takken.

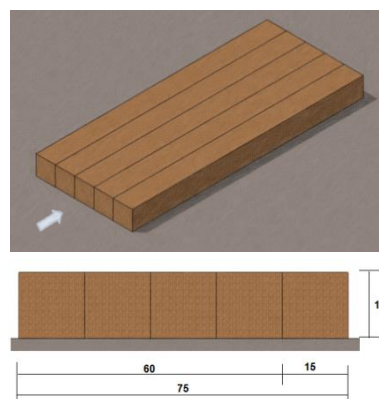


Figuur 2.6: Variatie D, met vorm en aanwezigheid van takken als variabelen

2.4.5 Variatie E

De proef uit variatie E is in het onderzoek van C. Çete en S. Haage (2016) ook uitgevoerd. De herhaling van deze proef dient dan ook als controle. Er wordt gekeken of er dezelfde resultaten worden waargenomen en zo niet waar dit aan ligt. Zo wordt er verwacht dat de dichtheid van de boomstammen is veranderd en dit de waardes beïnvloedt.

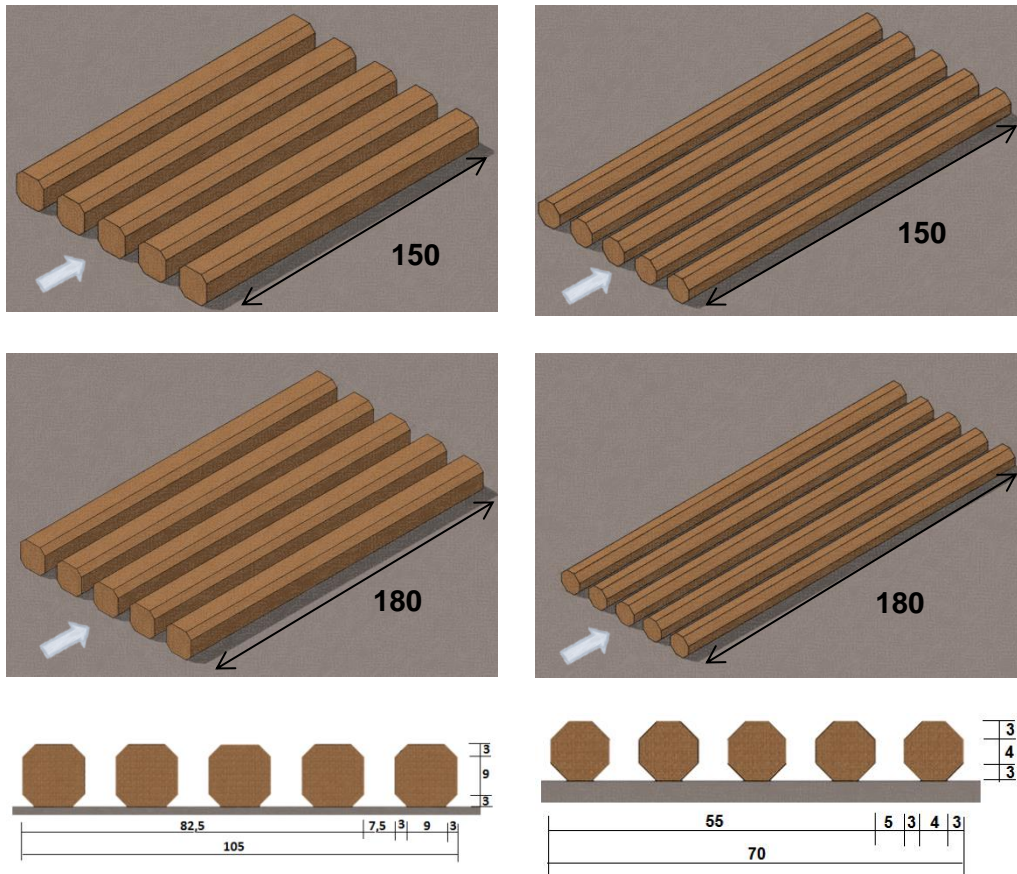
C. Çete en S. Haage (2016) hebben gebruik gemaakt van vierkante bomen en hebben die tegen elkaar aan gelegd, Figuur 2.7. De proef is uitgevoerd op een zeer grove stenen bodem. Om te kijken naar de invloed van de steenbodem wordt dezelfde proef ook uitgevoerd met de grove zandbodem en de fijne zandbodem.



Figuur 2.7: Variatie E, controleproef

2.4.6 Variatie F

In Figuur 2.8 is variatie F afgebeeld. Bij deze opstelling is evenals bij variatie A gekozen om 5 boomstammen iets uit elkaar, parallel aan de stroomrichting te testen. Deze opstelling varieert echter ook de lengte en diameter. Omdat drie van de vier maten boomstammen nog niet aanwezig waren in het testmateriaal zijn deze bijgemaakt. Hierdoor is er vergeleken met de andere variaties een andere dichtheid en kan deze invloed beter bestudeerd worden.



Figuur 2.8: Variatie F met dikte en lengte als variabelen

2.5 Overzicht proefopstellingen huidig onderzoek

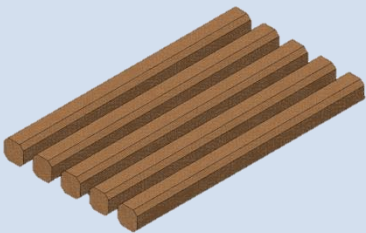
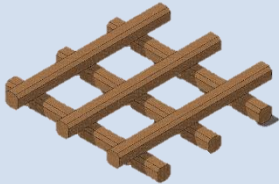
Hieronder, in Tabel 2.4, is een overzicht te zien van alle proeven die uitgevoerd zullen worden. Alle proeven hebben een naam gekregen om zo gemakkelijk te zien welke variabelen en constanten getest worden, zie Tabel 2.3.

Alle bomen hebben een afmeting van 180 mm x 15 mm behalve als anders is aangegeven. In variatie F wordt getest met boomstammen die minder lang ondergedompeld zijn waardoor de dichtheid afwijkt. (Bijlage 3: Dichtheden boomstammen).

Tabel 2.3: Verklaring naamgeving opstellingen

Plek 1: Opstelling variatie	A Opstelling variatie A B Opstelling variatie B C Opstelling variatie C D Opstelling variatie D E Opstelling variatie E F Opstelling variatie F
Plek 2: Doorsnede vorm	a Rondhoekige doorsnede b Ovaalvormige doorsnede c Vierkante doorsnede
Plek 3: Wel/geen takken	0 Geen takken 1 Met takken
Plek 4: Bodem	0 Grove zandbodem 1 Fijne zandbodem 2 Stenenbodem
Plek 5: Stapel lagen	1 Enkel laags 2 Twee laags 3 Drie laags 4 Anders
Plek 6: Oriëntatie	0 0 Graden 1 45 Graden 2 180 Graden
Plek 7: Overig	KB Boomstammen (l x b) 150 mm x 15 mm KS Boomstammen (l x b) 150 mm x 10 mm LB Boomstammen (l x b) 180 mm x 15 mm LS Boomstammen (l x b) 180 mm x 10 mm * Inclusief boomwortels V Inclusief versteviging

Tabel 2.4: Opstellingen huidig onderzoek

Naamgeving	Voorbeeld opstelling
Variatie A	
Aa0010 Aa0110 Aa1010 Aa1110 Ab0010 Ab0110 Ab1010 Ab1110	
Variatie B	
Ba0020 Ba0021 Ba0030 Ba0031 Ba1020 Ba1021 Ba1030	

Ba0031
Bb0020
Bb0021
Bb0030
Bb0031
Bb1020
Bb1021
Bb1030
Bb0031

Variatie C

Ca1040
Ca1042
Ca1040*
Ca1042*
Ca1040*V
Ca1040V

Variatie D

Da0020
Da1020
Db0020
Db1020

Variatie E

Ec0010
Ec0110
Ec0210

Variatie F

Fa0010KB
Fa0010KS
Fa0010LB
Fa0010LS



3. Meetmethode

In dit hoofdstuk wordt eerst een overzicht gegeven van de gebruikte materialen. Daarna wordt de proefopstelling beschreven met de daarbij horende constanten en de variabelen. Vervolgens wordt de schakeling van de apparatuur in het hoofdstuk 'meetopstelling' toegelicht.

3.1 Materialen

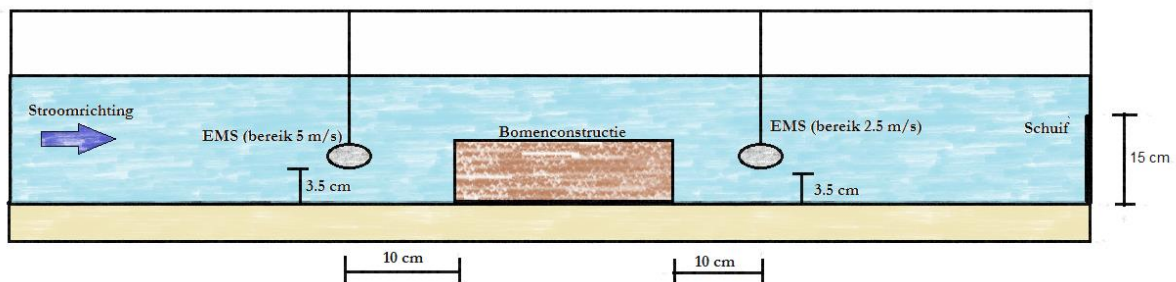
Overzicht gebruikte materialen:

- * 2x Stroomgoot (breedte 20 cm)
- * 2x EMS (bereik 2.5 m/s & 1 m/s)
- * 2x EMS (bereik 5 m/s & 1 m/s)
- * 1x Bodemplaat fijn zand
- * 2x Bodemplaat grof zand
- * 1x Bodemplaat grof gesteente
- * 2x Computer
- * 2x Camera acA2500
- * 2x Pulsenteller
- * Verschillende boomstammen
- * Visdraad
- * Punaises
- * Gaas 4 x 4 cm (maas 5mm)
- * Kaliumpermanganaat
- * Klei

Het visdraad wordt gebruikt voor de verbinding van de opstellingen uit variatie B. Het gaas wordt gebruikt om de wortels van de boomstammen in variatie C te simuleren. Het gaas wordt met behulp van punaises aan de boomstammen vast gemaakt. De klei wordt gebruikt voor de versterking in proef Ca1040V en Ca1040*V. Met kaliumpermanganaat kan de stroming zichtbaar gemaakt worden.

3.2 Proefopstelling

In Figuur 3.1 is het zijaanzicht van de proefopstelling te zien. De gebruikte getalswaarden en afstanden die gebruikt zijn zullen in dit hoofdstuk worden toegelicht. Om de efficiëntie van de proeven te vergroten is gewerkt in twee goten met een identieke opstelling.



Figuur 3.1: Proefopstelling zijaanzicht

3.2.1 Constanten

Plaatsing EMS

Een EMS is een elektromagnetische sensor, waarmee de snelheid op een bepaald punt gemeten kan worden. De plaatsing van de EMS hangt af van de methode voor de benadering van de kritieke stroomsnelheid. De benaderingen kunnen plaats vinden op basis van Izbash en op basis van Shields. In dit onderzoek worden beide benaderingen onderzocht en daarom zullen er bij elke proef twee EMS'en tegelijk gebruikt worden.

Vindt de benadering plaats op basis van Izbash dan dient de snelheid dicht bij de bodem gemeten te worden (Schierreck & Verhagen, 2000). De EMS werkt met elektromagnetische inductie, de minimale afstand vanaf de bodem waar de EMS geen invloed ervaart van de bodem is 3.5 cm.

De benadering van Shields kan gebruikt worden bij een uniforme stroming. Bij een afwijking van de uniforme stroming moet een correctiefactor gebruikt worden, indien deze te ver afwijkt kan dit leiden tot foutieve resultaten (Schiereck & Verhagen, 2000).

Door de gevonden kritieke snelheid, dichtheid, lengte en breedte in de formule van Izbash en Shields in te vullen kan een dimensie loze parameter verkregen worden, waardoor de resultaten met elkaar te vergelijken zijn. Zie vergelijking (3.1) en (3.2). Met de methode van Izbash zijn echter drie variabelen aanwezig, die enkel bepaald kunnen worden door de breedte, diameter en de dichtheid te variëren. Voor de proeven waar hierin niet gevarieerd wordt, worden de k_1 en k_2 term verwaarloosd. Dit wordt gedaan omdat k_3 een aanzienlijk groter aandeel veroorzaakt door de vermenigvuldiging met L^2 (Çete & Haage, 2016). Bij Shields is maar één variabele onbekend die bepaald kan worden aan de hand van de meetresultaten.

$$u_c^2 = \Delta \frac{gdL^2}{k_1 d^2 + k_2 dL + k_3 L^2} \quad (3.1)$$

$$\psi_c = f(Re^*) = f\left(\frac{u_{*c} d}{\nu}\right) \quad (3.2)$$

Schuifhoogte

Door de diepte kleiner te houden dan 1/3 van de breedte van de goot worden de driedimensionale wrijvingseffecten ten gevolge van de wanden gering gehouden (Stuifbergen, 1981). Om dit te bereiken zou de waterhoogte 6.7 cm of lager moeten zijn. In het voorgaande onderzoek hebben C. Çete en S. Haage (2016) de schuifhoogte op 15 cm gezet. Om resultaten te kunnen vergelijken wordt dat in dit onderzoek ook aangehouden.

Bodemruwheid

De proeven zijn uitgevoerd op platen met drie verschillende ruwheden. De grofste ruwheid is een plaat met stenen. De ruwheid hiervan is bepaald in vorig onderzoek en vastgesteld op $k=11.3$ mm (Çete & Haage, 2016). De ruwheid van de grove zandbodem is $k=0.4$ mm en van de fijne zandbodem $k=0.2$ mm. Voor de bepaling hiervan zie Bijlage 4: Bepaling ruwheid zand.

3.2.2 Variabelen

Dichtheid boomstammen

De dichtheid van de boomstammen is bepaald door de massa van vijf boomstammen te delen door het volume van dezelfde vijf boomstammen. Omdat de vorm van de boomstammen verschillen van elkaar en de takken niet van hetzelfde materiaal zijn, is dit gedaan voor alle verschillende type boomstammen. Het volume is bepaald met behulp van een waterkolom en het gewicht is bepaald met behulp van een weegschaal. De dichtheid is nu te bepalen met vergelijking (3.3). Zie Bijlage 3: Dichtheden boomstammen.

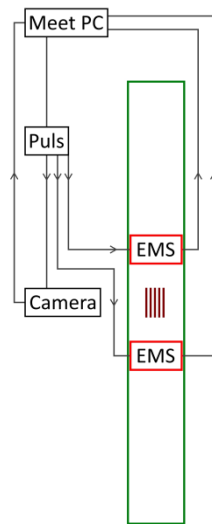
$$\rho = \frac{M}{V} \quad (3.3)$$

Viscositeit

De viscositeit wordt bepaald aan de hand van de temperatuur die aan het begin van de dag gemeten wordt.

3.3 Meetopstelling

De kritieke stroomsnelheid wordt gedefinieerd als de lokale stroomsnelheid die gemeten wordt door de EMS op 3.5 cm boven de bodem en 10 cm voor én na de constructie bij bezwijken van de constructie. De EMS meet de snelheid 20 tot 1000 keer per seconde en wordt aangestuurd door een pulsenteller. Deze pulsenteller stuurt ook de camera aan die op een lagere frequentie foto's maakt (ca. 10 Hz). Doordat de pulsenteller beide apparaten aanstuurt en deze gegevens geregistreerd worden op de meetcomputer, is bekend welke gemeten snelheid bij welke foto hoort.



Figuur 3.2: Overzicht opstelling

3.4 Bepaling kritieke stroomsnelheid

De constructie kan op verschillende manieren bezwijken. Als een van deze manieren voorkomt wordt de volledige constructie als bezweken beschouwd.

- * Als de constructie of een deel ervan door de stroming bezwijkt. Er treedt geen nieuw evenwicht op.
- * Als de constructie of een deel ervan verplaatst en daardoor in contact komt met een van de wanden van de stroomgoot.
- * Als de volledige constructie verschuift en niet in een nieuwe evenwichtsstand komt.

Bij het analyseren van de foto's wordt de foto waarop de constructie begint met bezwijken gekozen. De daarbij behorende kritieke stroomsnelheid is de gemiddelde snelheid van vijf metingen gemiddeld over de twee seconde voor bezwijken.

4. Uitvoering

In dit hoofdstuk wordt eerst de procedure van het uitvoeren van de proeven besproken. Aangezien dit onderzoek een vervolgonderzoek op het onderzoek van C. Çete en S. Haage (2016) is, worden een aantal proeven herhaald. Uiteindelijk wordt toegelicht hoe het verloop van proefopstellingen uit het huidige onderzoek is verlopen.

4.1 Procedure

De proeven zijn uitgevoerd in twee stroomgoten met een interne breedte van 20 cm. Alle proeven zijn uitgevoerd in het waterlaboratorium van de Technische Universiteit Delft, faculteit civiele techniek. Omdat het mogelijk is dat de twee stroomgoten niet exact hetzelfde zijn wordt elke opstellingsvariatie in dezelfde stroomgoot getest. In Bijlage 5: Uitvoering proeven, is een overzicht te zien van alle proeven met daarbij de goot waarin is getest.

De EMS van goot 2 heeft 20 metingen per seconde gemaakt in plaats van 1000. De metingen zijn echter nog wel relevant en zullen toch gebruikt worden.

De uitvoering van de proeven verliep volgens het volgende stappenplan:

1. Bodemplaat installeren
2. EMS-hoogte en plaats juist afstellen
3. Schuifhoogte controleren
4. Bomenconstructie plaatsen
5. Water vol laten lopen tot schuifhoogte
6. Twee minuten wachten voor stilstaand water
7. Op stilstaand water apparatuur kalibreren
8. EMS en camera meting starten
9. Langzaam de kraan opendraaien tot bezwijken van de constructie

Uiteindelijk is de hoogte van de EMS versteld om zo informatie te verkrijgen over het snelheidsprofiel per variatie. De uitvoering hiervan liep volgens het volgende stappenplan:

1. Plaatsing constructie
2. Op stilstaand water apparatuur kalibreren
3. Stroomsnelheid verhogen tot 0.3 m/s
4. Waterhoogte aflezen bij de stroomsnelheid
5. Stroming uitzetten
6. Sluis verhogen zodat de hoogte gelijk is aan de waterhoogte bij 0.3 m/s
7. Stroomgoot vol laten lopen tot die hoogte
8. Bij stilstaand water de voorste EMS kalibreren
9. Verhoog voorste EMS 1 cm
10. Meet 15 seconden
11. Herhaal stap 9 en 10 over de gehele diepte
12. Zet EMS weer op standaard hoogte.
13. Herhaling stap 8-12 voor de achterste EMS
14. Zet de sluis weer op standaardhoogte
15. Verhoog de stroomsnelheid tot 0.3 m/s
16. Verhoog voorste EMS 1 cm
17. Meet 30 seconde
18. Herhaal stap 16 en 17 over de gehele diepte
19. Zet EMS weer op standaard hoogte
20. Herhaling stap 16-19 voor achterste EMS
21. Herhaling 2-20 met een snelheid van 0.2 m/s

4.2 Herhaling proeven

Allereerst wordt een proef van C. Çete en S. Haage (2016) herhaald. Dit wordt gedaan in goot 1, aangezien deze goot bij dat onderzoek ook gebruikt is. Zo blijven zoveel mogelijk aspecten van de proef constant. Een proef wordt herhaald zodat de resultaten van het onderzoek vergeleken kunnen worden met de resultaten van het vorige onderzoek. Als deze overeenkomen kunnen beide datasets gebruikt worden bij het bepalen van de kritieke stroomsnelheid.

Er is ook besloten om de herhalingsproefopstelling uit te voeren bij een fijne en grove zandbodem. Zodat het effect van de bodemruwheid goed uit de resultaten af te leiden is.

Bij het uitvoeren van de proeven bezweek de constructie niet bij een schuifhoogte van 15 cm. C. Çete en S. Haage (2016) verlaagden dan de schuifhoogte totdat de constructie wel bezweek. Door het verlagen van de schuifhoogte wordt een extra variabele gecreëerd. Om dit te voorkomen is ervoor gekozen om de standaard schuifhoogte aan te passen naar een hoogte van 7.5 cm. Dit is in alle proeven aangepast.

4.3 Overige proeven

In de overige opstellingen wordt gevarieerd in de bodemruwheid, dichtheid, vorm, soort opstelling, rotatie en de aanwezigheid van takken.

Bij variatie B is gebruik gemaakt van visdraad om de bomen met elkaar te verbinden. De helft van de proeven kon echter niet uitgevoerd worden. De constructies konden door de te smalle goot niet 45 graden gedraaid worden en zijn daarom niet onderzocht.

Bij variatie C is gebruikt gemaakt van een stuk gaas van 4 x 4 cm om te wortels te simuleren. Met behulp van punaises is dit gaas aan de boomstammen bevestigd. Ook viel bij de proeven op dat variatie C, rotatie 0 graden, bezweek door het wegglijden van de gehele constructie. Door het plaatsen van klei achter een aantal boomstammen wordt dit voorkomen, in praktijk zouden de bomen dan een klein stuk ingegraven worden. Om die reden zijn nog twee proeven toegevoegd.

Bij proeven variatie C werd de snelheid achter de constructie enorm gereduceerd. Om die reden is er kaliumpermanganaat aan de stroming toegevoegd om zo de stroming in beeld te kunnen krijgen.

4.4 Snelheidsprofiel

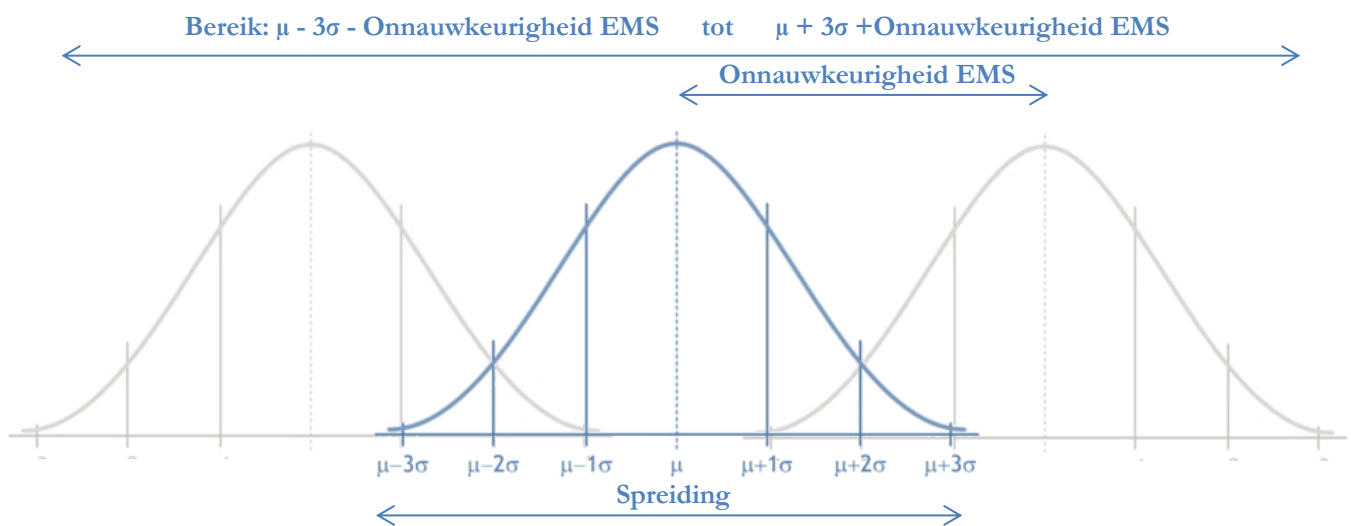
Het snelheidsprofiel is bepaald voor de proeven Ab1010, Bb1020, Bb1030, Ca1040* en Db1020. Er wordt aangenomen dat het snelheidsprofiel per constructie variatie ongeveer gelijk is.

5. Resultaten

Bij het analyseren van de resultaten is de nauwkeurigheid van de metingen een belangrijk aspect. Daarom wordt eerst besproken hoe de nauwkeurigheid van dit onderzoek is bepaald en daarna worden de resultaten gepresenteerd.

5.1 Nauwkeurigheid resultaten

De data verkregen van de EMS is te benaderen met een normaalverdeling, zie Bijlage 6: Normaalverdeling. Hieruit volgt 99.7% van de gemeten data ligt tussen $\mu - 3\sigma$ en $\mu + 3\sigma$. De EMS meet echter ook met een onnauwkeurigheid. Deze onnauwkeurigheid is in de orde van 1% van de volle schaal uitslag (Çete & Haage, 2016). Dit houdt in bij een meetbereik van 1 m/s dat de onnauwkeurigheid 0.01 m/s zal bedragen. Nu is het bereik van de gemiddelde kritieke snelheid te bepalen, zie Figuur 5.1 en Tabel 5.1.



Figuur 5.1: Bereik meetresultaten

5.2 Kritieke stroomsnelheden

De kritieke stroomsnelheid is de gemiddelde stroomsnelheid twee seconde voor bezwijken van de vijf metingen die zijn uitgevoerd. In Tabel 5.1 is een overzicht gegeven van de kritieke snelheden die gemeten zijn bij de verschillende proeven. Ook is in deze tabel het spreidingsinterval gegeven.

In Bijlage 7: Resultaten snelheden, zijn alle snelheden van de vijf metingen weergegeven 2 seconde voordat de constructie bezwijkt.

Tabel 5.1: Kritieke snelheden en nauwkeurigheid per proefopstelling

	Gemiddelde kritieke snelheid voor constructie (m/s) ¹	Gemeten gemiddelde standaarddeviatie voor kritieke voor constructie (m/s) ²	Gemeten spreiding standaarddeviatie voor constructie (m/s) ³	Berekende bereik gemiddelde kritieke snelheid voor constructie (m/s) ⁴	Gemiddelde kritieke snelheid achter constructie (m/s) ¹	Gemeten gemiddelde standaarddeviatie achter constructie (m/s) ²	Gemeten spreiding standaarddeviatie achter constructie (m/s) ³	Berekende bereik gemiddelde kritieke snelheid achter constructie (m/s) ⁴
Aa0010	0.42	0.014	0.014 - 0.024	0.33 – 0.51	0.45	0.013	0.016 - 0.035	0.39 - 0.51
Aa0110	0.45	0.006	0.010 – 0.022	0.38 – 0.52	0.47	0.007	0.009 – 0.021	0.42 – 0.51
Aa1010	0.48	0.012	0.015 – 0.028	0.40 – 0.57	0.53	0.008	0.010 – 0.029	0.48 – 0.58
Aa1110	0.47	0.007	0.016 – 0.025	0.39 – 0.54	0.50	0.007	0.012 – 0.029	0.46 – 0.55
Ab0010	0.43	0.009	0.008 – 0.026	0.35 – 0.51	0.47	0.007	0.011 – 0.019	0.43 – 0.52
Ab0110	0.47	0.009	0.011 – 0.021	0.39 – 0.54	0.50	0.010	0.008 – 0.023	0.44 – 0.55
Ab1010	0.49	0.013	0.014 – 0.028	0.40 – 0.58	0.52	0.008	0.014 – 0.021	0.47 – 0.57
Ab1110	0.45	0.012	0.013 – 0.022	0.37 – 0.54	0.49	0.011	0.012 – 0.031	0.43 – 0.55
Ba0020	0.33	0.005	0.009 – 0.016	0.27 – 0.40	0.38	0.013	0.016 – 0.051	0.32 – 0.45
Ba0030	0.38	0.007	0.011 – 0.017	0.31 – 0.45	0.33	0.016	0.030 – 0.072	0.26 – 0.41
Ba1020	0.41	0.007	0.008 - 0.024	0.33- 0.48	0.46	0.019	0.031 – 0.073	0.41 – 0.51
Ba1030	0.36	0.008	0.009 – 0.029	0.29 – 0.44	0.27	0.019	0.030 – 0.056	0.19 – 0.35
Bb0020	0.31	0.003	0.005 – 0.011	0.25 – 0.37	0.36	0.010	0.013 – 0.033	0.31 – 0.42
Bb0030	0.39	0.006	0.012 – 0.047	0.32 – 0.46	0.39	0.025	0.011 – 0.062	0.29 – 0.49
Bb1020	0.38	0.006	0.007 – 0.020	0.31 – 0.44	0.42	0.017	0.021 – 0.051	0.34 – 0.49
Bb1030	0.36	0.007	0.011 – 0.017	0.33 – 0.39	0.29	0.029	0.029 – 0.085	0.19 – 0.38
Ca1040	0.31	0.004	0.006 – 0.012	0.25 – 0.38	0.16	0.012	0.020 – 0.071	0.10 – 0.22
Ca1042	0.37	0.007	0.005 – 0.013	0.30 – 0.44	-0.05	0.010	0.011 – 0.031	-0.11 – 0.00
Ca1040*	0.36	0.008	0.008 – 0.027	0.29 - 0.43	0.14	0.018	0.009 – 0.040	0.06 – 0.22
Ca1042*	0.33	0.006	0.007 – 0.019	0.26 – 0.40	0.09	0.006	0.010 – 0.015	0.05 – 0.13
Ca1040*V	0.36	0.009	0.012 – 0.025	0.29 – 0.44	0.16	0.016	0.015 - 0.046	0.08 – 0.23
Ca1040V	0.33	0.009	0.010 – 0.025	0.26 – 0.41	0.13	0.017	0.014 – 0.049	0.06 – 0.21
Da0020	0.38	0.006	0.012 – 0.021	0.31 – 0.45	0.37	0.016	0.010 – 0.033	0.29 – 0.44
Da1020	0.41	0.009	0.009 – 0.030	0.34 – 0.49	0.39	0.018	0.012 – 0.060	0.31 – 0.47
Db0020	0.38	0.005	0.011 – 0.016	0.31 – 0.44	0.38	0.006	0.010 – 0.019	0.33 – 0.42
Db1020	0.45	0.007	0.010 – 0.025	0.37 – 0.52	0.34	0.018	0.021 - 0.048	0.27 – 0.42
Ec0010	0.42	0.009	0.011 – 0.026	0.34 – 0.50	0.46	0.008	0.014 – 0.027	0.42 – 0.51
Ec0110	0.45	0.005	0.009 – 0.026	0.39 – 0.52	0.48	0.008	0.010 – 0.023	0.43 – 0.53
Ec0210	0.52	0.010	0.013 – 0.037	0.44 – 0.60	0.55	0.009	0.013 – 0.037	0.50 – 0.61
Fa0010KB	0.44	0.015	0.013 – 0.025	0.38 – 0.49	0.39	0.010	0.007 – 0.055	0.35 - 0.43
Fa0010KS	0.41	0.005	0.008 – 0.024	0.38 – 0.43	0.39	0.004	0.009 – 0.016	0.37 – 0.42
Fa0010LB	0.43	0.007	0.014 – 0.020	0.40 – 0.46	0.41	0.008	0.009 – 0.019	0.38 – 0.45
Fa0010LS	0.41	0.006	0.009 – 0.023	0.38 – 0.44	0.39	0.007	0.010 – 0.023	0.36 – 0.42

¹ Het gemiddelde van de vijf metingen en daarvan het gemiddelde over de twee seconden voor bezwijken.

² Standaarddeviatie over de gemiddelde kritieke snelheid van de vijf metingen.

³ Minimale standaarddeviatie van een enkele meting versus de maximale standaarddeviatie van een enkele meting over de twee seconde voor bezwijken.

⁴ Gemiddelde kritieke snelheid van de vijf metingen over de twee seconden voor bezwijken minus/ plus driemaal de standaarddeviatie van de gemiddelde kritieke snelheid minus/ plus de onnauwkeurigheid van de EMS

Om de kritieke stroomsnelheid van de boomstammen in de praktijk te weten worden de gevonden kritieke snelheden uit het schaalmodel vermenigvuldigd met $\sqrt{10}$. Op deze manier wordt het schaalmodel 10 keer vergroot. (Çete & Haage, 2016).

Tabel 5.2: Kritieke snelheid omgerekend naar de werkelijkheid

	Gemiddelde kritieke snelheid voor constructie (m/s)	Gemiddelde kritieke snelheid voor constructie omgerekend naar de werkelijkheid (m/s)
Aa0010	0.42	1.3
Aa0110	0.45	1.4
Aa1010	0.48	1.5
Aa1110	0.47	1.5
Ab0010	0.43	1.4
Ab0110	0.47	1.5
Ab1010	0.49	1.5
Ab1110	0.45	1.4
Ba0020	0.33	1.0
Ba0030	0.38	1.2
Ba1020	0.41	1.3
Ba1030	0.36	1.4
Bb0020	0.31	0.98
Bb0030	0.39	1.2
Bb1020	0.38	1.2
Bb1030	0.36	1.1
Ca1040	0.31	0.98
Ca1042	0.37	1.2
Ca1040*	0.36	1.1
Ca1042*	0.33	1.0
Ca1040*V	0.36	1.1
Ca1040V	0.33	1.0
Da0020	0.38	1.2
Da1020	0.41	1.3
Db0020	0.38	1.2
Db1020	0.45	1.4
Ec0010	0.42	1.3
Ec0110	0.45	1.4
Ec0210	0.52	1.6
Fa0010KB	0.44	1.4
Fa0010KS	0.41	1.3
Fa0010LB	0.43	1.4
Fa0010LS	0.41	1.3

5.3 Turbulentie

De turbulentie is bepaald aan de hand van het snelheidsprofiel, zie Bijlage 8: Snelheidsprofiel.

Tabel 5.3: Relatieve fluctuatie intensiteit constructie Ab1010

Ab1010

Hoogte Vanaf bodem (cm)	0.2 m/s		0.3 m/s	
	r_u voor	r_u achter	r_u voor	r_u achter
3.5	0.0501	0.0668	0.0712	0.0687
4.5	0.0640	0.0458	0.0721	0.0519
5.5	0.0519	0.0450	0.0776	0.0499
6.5	0.0357	0.0496	0.0884	0.0437
7.5	0.0588	0.0436	0.0770	0.0606
8.5	0.0951	0.0427	0.0714	0.0544
9.5	0.0734	0.0354	0.0629	0.0539
10.5	0.0749		0.0561	0.0374
11.5	0.0890	0.0379	0.0841	0.0502
12.5	0.0688	0.0407	0.0539	0.0400
13.5		0.0448	0.0538	0.0401
14.5			0.0612	0.0371

Tabel 5.4: Relatieve fluctuatie intensiteit constructie Bb1020

Bb1020

Hoogte Vanaf bodem (cm)	0.2 m/s		0.3 m/s	
	r_u voor	r_u achter	r_u voor	r_u achter
3.5	0.3130	0.2661	0.2953	0.2984
4.5	0.2792	0.1660	0.2456	0.1768
5.5	0.3061	0.0739	0.1995	0.0660
6.5	0.2713	0.0529	0.2469	0.0546
7.5	0.02769	0.0369	0.2727	0.0380
8.5	0.2599	0.0301	0.2797	0.0443
9.5	0.2244	0.0265	0.2300	0.0396
10.5	0.2693	0.0327	0.2386	0.0429
11.5	0.2342	0.0305	0.2317	0.0374
12.5	0.2572	0.0374	0.2339	0.0289
13.5			0.2093	0.0346
14.5			0.2381	0.0328
15.5			0.3217	0.0403

Tabel 5.5: Relatieve fluctuatie intensiteit constructie Bb1030

Bb1030

Hoogte Vanaf bodem (cm)	0.2 m/s		0.3 m/s	
	r_u voor	r_u achter	r_u voor	r_u achter
3.5	0.2207	0.2101	0.2362	0.2445
4.5	0.2133	0.2301	0.2455	0.2760
5.5	0.2455	0.2526	0.1967	0.2137
6.5	0.2306	0.1511	0.1953	0.1594
7.5	0.2153	0.0913	0.2275	0.0829
8.5	0.2158	0.0639	0.2370	0.0867
9.5	0.2123	0.0418	0.2210	0.0510
10.5	0.2348	0.0336	0.2226	0.0478
11.5	0.2196	0.0356	0.2298	0.0384
12.5	0.2134	0.0319	0.2625	0.0330
13.5			0.2467	0.0318
14.5			0.2304	0.0324
15.5				0.0389

Tabel 5.6: Relatieve fluctuatie intensiteit constructie Ca1040*

Ca1040*

Hoogte Vanaf bodem (cm)	0.2 m/s		0.3 m/s	
	r_u voor	r_u achter	r_u voor	r_u achter
3.5	0.2521	0.3521	0.1625	0.1694
4.5	0.3733	0.2173	0.3162	0.2600
5.5	0.2892	0.2453	0.2550	0.2388
6.5	0.3347	0.1566	0.2034	0.2210
7.5	0.3596	0.1372	0.2700	0.1940
8.5	0.2521	0.1342	0.2942	0.2102
9.5	0.3108	0.1186	0.2786	0.1744
10.5	0.2237	0.0893	0.1695	0.1485
11.5	0.3024	0.0745	0.2792	0.0621
12.5	0.2958	0.0382	0.2391	0.0728
13.5		0.0438	0.1671	0.0348
14.5			0.1677	0.0291
15.5				

Tabel 5.7: Relatieve fluctuatie intensiteit constructie Db1020

Db1020

Hoogte Vanaf bodem (cm)	0.2 m/s		0.3 m/s	
	r_u voor	r_u achter	r_u voor	r_u achter
3.5	0.1704	0.1320	0.1795	0.1104
4.5	0.1474	0.1312	0.1670	0.1264
5.5	0.1632	0.0842	0.1908	0.0739
6.5	0.1556	0.0466	0.1089	0.0477
7.5	0.1533	0.0420	0.1803	0.0452
8.5	0.1883	0.0500	0.1539	0.0409
9.5	0.2226	0.0339	0.1705	0.0358
10.5	0.1725	0.0331	0.1849	0.0331
11.5	0.1485	0.0464	0.1679	0.0371
12.5	0.1532	0.0471	0.1665	0.0389
13.5			0.1649	0.0379
14.5			0.1990	0.0425
15.5			0.1306	0.1238

5.4 Formule voor kritieke stroomsnelheid boomstammen

In Tabel 5.8 zijn de formules gegeven om de kritieke stroomsnelheid mee te beschrijven op basis van Izbash en op basis van Shields. Bij de benadering van Izbash zijn bij alle opstellingen met uitzondering van de opstellingen uit variatie F, de k1 en k2 waarde verwaarloosd. Bij variatie F wordt aangenomen dat de k1, k2 en k3 in alle opstellingen gelijk aan elkaar zijn omdat alleen gevarieerd wordt in de diameter en de lengte van de boomstammen. Met dit gegeven zijn de optimale k1, k2 en k3 waarde bepaald waarbij de kritieke stroomsnelheid juist benaderd wordt.

Tabel 5.8: Formule voor kritieke snelheid boomstammen per constructie

Opstelling	Formule op basis van Izbash zonder turbulentie	Formule op basis van Izbash met turbulentie	Formule op basis van Shields zonder turbulentie	Formule op basis van Shields met turbulentie
Aa0010	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.230}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.215}}$	$f(332.7) = 0.011$	$f(343.8) = 0.012$
Aa0110	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.200}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.195}}$	$f(332.6) = 0.011$	$f(332.0) = 0.011$
Aa1010	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.170}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.162}}$	$f(380.2) = 0.015$	$f(389.7) = 0.016$
Aa1110	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.178}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.173}}$	$f(342.2) = 0.012$	$f(347.3) = 0.013$
Ab0010	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.213}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.204}}$	$f(340.6) = 0.012$	$f(347.7) = 0.013$
Ab0110	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.178}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.172}}$	$f(342.2) = 0.016$	$f(348.8) = 0.013$
Ab1010	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.166}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.157}}$	$f(388.1) = 0.016$	$f(398.4) = 0.016$
Ab1110	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.197}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.187}}$	$f(327.6) = 0.011$	$f(336.4) = 0.012$
Ba0020	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.372}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.361}}$	$f(261.4) = 0.007$	$f(265.4) = 0.007$
Ba0030	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.280}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.270}}$	$f(301.0) = 0.009$	$f(306.5) = 0.010$
Ba1020	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.234}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.226}}$	$f(324.8) = 0.011$	$f(330.3) = 0.011$
Ba1030	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.303}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.290}}$	$f(285.2) = 0.008$	$f(291.5) = 0.009$
Bb0020	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.410}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.402}}$	$f(245.6) = 0.006$	$f(247.9) = 0.006$
Bb0030	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.259}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.251}}$	$f(308.9) = 0.010$	$f(313.7) = 0.010$
Bb1020	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.276}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.268}}$	$f(301.0) = 0.009$	$f(305.7) = 0.010$
Bb1030	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.308}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.296}}$	$f(285.2) = 0.008$	$f(290.7) = 0.009$
Ca1040	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.409}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.398}}$	$f(245.6) = 0.006$	$f(248.7) = 0.006$
Ca1042	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.287}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.276}}$	$f(293.1) = 0.009$	$f(298.6) = 0.009$

Ca1040*	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.303}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.290}}$	$f(285.2) = 0.008$	$f(291.5) = 0.009$
Ca1042*	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.361}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.348}}$	$f(261.4) = 0.007$	$f(266.2) = 0.007$
Ca1040*V	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.303}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.288}}$	$f(285.2) = 0.008$	$f(292.3) = 0.009$
Ca1040V	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.361}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.342}}$	$f(261.4) = 0.007$	$f(268.5) = 0.008$
Da0020	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.372}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.359}}$	$f(261.4) = 0.007$	$f(266.2) = 0.007$
Da1020	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.272}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.260}}$	$f(301.0) = 0.009$	$f(308.1) = 0.010$
Db0020	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.234}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.229}}$	$f(324.8) = 0.011$	$f(328.7) = 0.011$
Db1020	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.308}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.230}}$	$f(285.2) = 0.008$	$f(290.7) = 0.009$
Ec0010	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.227}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.218}}$	$f(332.7) = 0.011$	$f(339.8) = 0.012$
Ec0110	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.198}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.194}}$	$f(327.6) = 0.011$	$f(331.3) = 0.011$
Ec0210	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.148}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.143}}$	$f(714.9) = 0.052$	$f(728.7) = 0.054$
Fa0010KB	$\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d L^2}{-22.02d^2 + 4.13dL - 0.03L^2}}$	$u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d L^2}{-28.33d^2 + 4.95dL - 0.05L^2}}$	$f(348.5) = 0.016$	$f(360.4) = 0.017$
Fa0010KS			$f(216.5) = 0.018$	$f(219.2) = 0.018$
Fa0010LB			$f(340.6) = 0.015$	$f(346.2) = 0.016$
Fa0010LS			$f(216.5) = 0.019$	$f(219.7) = 0.019$

5.4.1 Controle gevonden verbanden op basis van Izbash

Proeven Aa0010, Fa0010KB, Fa0010KS, Fa0010LB en Fa0010LS zijn hetzelfde alleen de lengte, diameter en de dichtheid variëren. Om te controleren of de formule de kritieke stroomsnelheid juist benaderd moeten de onbekenden ingevuld worden. Ook is proef Ec0210 in een vorig onderzoek uitgevoerd, ook deze waarden worden ingevuld.

Tabel 5.9: Controle formule constructie Aa0010 op basis van Izbash

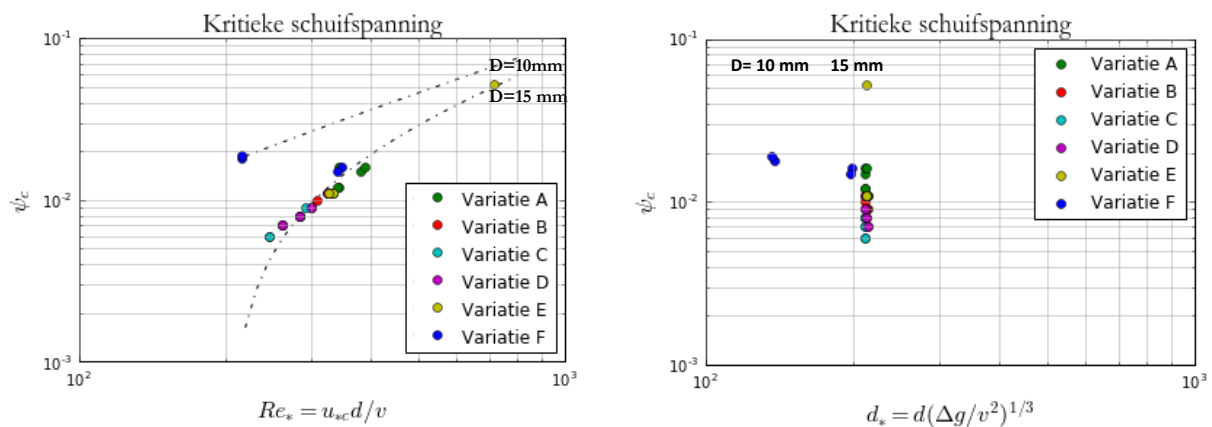
Constructie	Snelheid (m/s) zonder turbulentie aldus formule constructie Aa0010: $\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.230}}$	Snelheid (m/s) met turbulentie aldus formule constructie Aa0010: $u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.215}}$	Gemeten snelheid(m/s)
Fa0010KB	0.37	0.37	0.44
Fa0010KS	0.33	0.33	0.41
Fa0010LB	0.37	0.38	0.43
Fa0010LS	0.32	0.32	0.41

Tabel 5.10: Controle formule constructies variatie F op basis van Izbash

Constructie	Snelheid (m/s) zonder turbulentie aldus formule constructies variatie F: $\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d L^2}{-22.02d^2 + 4.13dL - 0.03L^2}}$	Snelheid (m/s) met turbulentie aldus formule constructies variatie F: $u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d L^2}{-28.33d^2 + 4.95dL - 0.05L^2}}$	Gemeten snelheid (m/s)
Aa0010	0.50	0.48	0.42

Tabel 5.11: Controle formule constructie Ec0210 op basis van Izbash

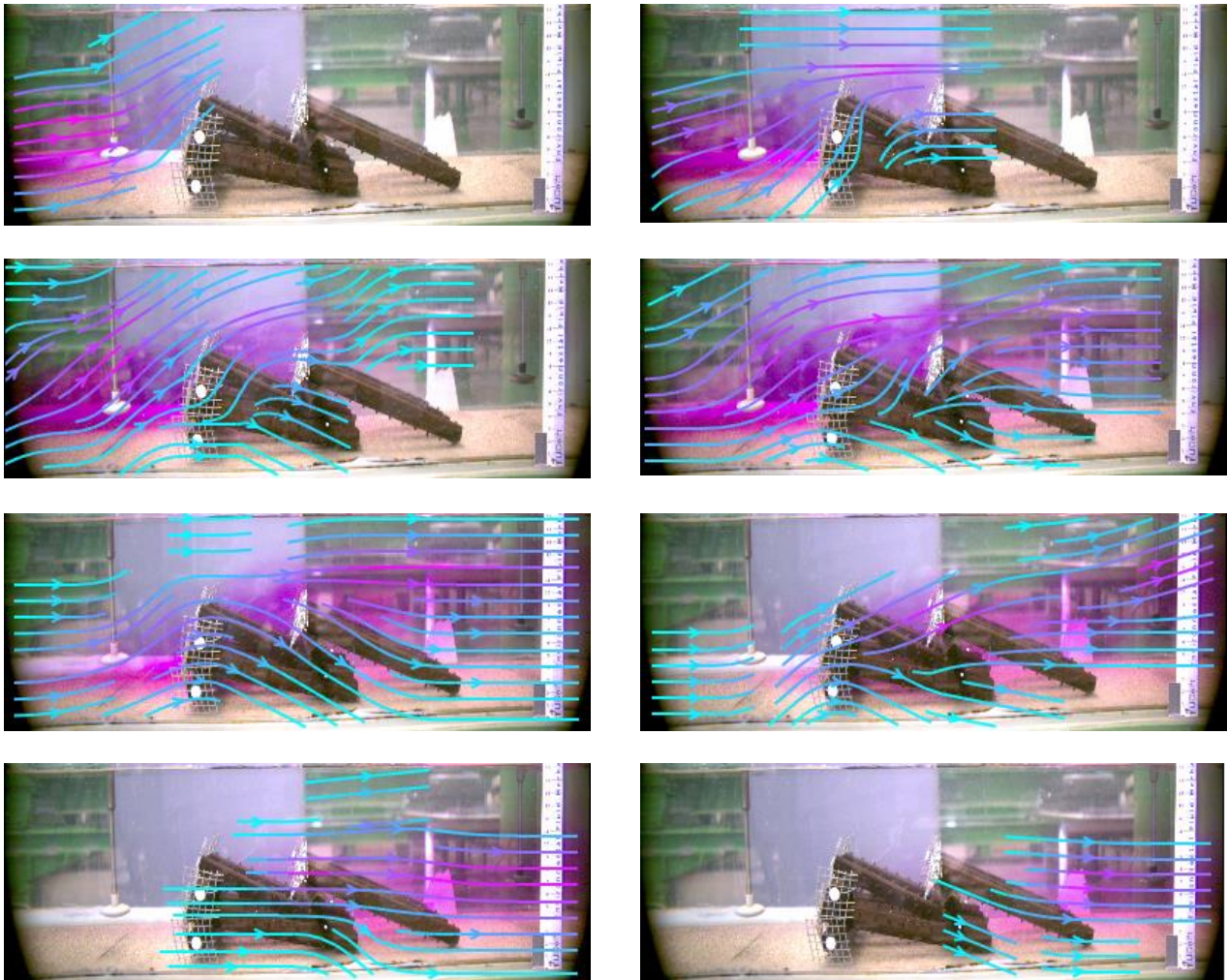
Constructie	Snelheid (m/s) zonder turbulentie aldus formule constructie Ec0210: $\bar{u}_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.148}}$	Snelheid (m/s) met turbulentie aldus formule constructie Ec0210: $u_c = \sqrt{\frac{\Delta g d}{0.143}}$	Gemeten snelheid(m/s)
Proef van C. Çete en S. Haage (2016)	0.47	Standaarddeviatie is niet bekend.	0.489



Figuur 5.2: Kritieke schuifspanning

5.5 Strooming door constructie Ca1040*

In de resultaten van de kritieke stroomsnelheden is duidelijk te zien dat de kritieke snelheid achter de constructie van variatie C veel lager is dan voor de constructie. Door het toevoegen van kaliumpermanganaat aan de strooming is onderzocht hoe de strooming zich gedraagt en aan hand van de resultaten in Figuur 5.3 wordt een verklaring gezocht voor de lage kritieke stroomsnelheid achter de constructie.



Figuur 5.3: Strooming door constructie Ca1040*

6. Conclusie

In dit hoofdstuk zullen op basis van de resultaten de verschillende deelvragen beantwoord worden. In '6.6 Toepassing van boomstammen als bodembescherming' wordt de hoofdvraag beantwoord en een advies gegeven over het toepassen van boomstammen als bodemscherming.

6.1 *Bezwijkmechanisme*

In dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op de deelvraag: 'Hoe bezwijkt de constructie?'. De afbeeldingen van de bezwijking per constructie zijn gegeven in Bijlage 9: Bezwijkmechanismen.

6.1.1 Bezwijkmechanisme opstelling variatie A

Alle opstellingen in variatie A bezwijken op dezelfde manier. Eén enkele stam begint met bewegen en indien deze niet opnieuw in een evenwicht terecht komt zet de boomstam een kettingreactie in werking. Door de beweging tikt de boomstam een andere boomstam aan waardoor ook voor deze boomstam de evenwichtspositie verstoord wordt. Indien de boomstammen uit de evenwichtspositie zijn, schuiven ze over de bodem naar achter of iets opzij.

6.1.2 Bezwijkmechanisme opstelling variatie B

De opstellingen in variatie B hebben twee verschillende bezwijkmechanismen die bij elke variant te zien zijn. Bij het eerste bezwijkmechanisme verschuift de constructie in zijn geheel en komt niet meer tot stilstand. Bij tweede bezwijkmechanisme draait de constructie waardoor het tegen de wand van de stroomgoot komt. Het eerste bezwijkmechanisme komt vaker voor bij constructies bestaande uit twee lagen en mechanisme twee komt vaker voor bij de drie-lagen constructies.

6.1.3 Bezwijkmechanisme opstelling variatie C

Opstelling variatie C bezwijkt op verschillende manieren:

1. De bovenste loodrecht op de stroomrichting gelegen boomstam raakt in beweging, hierdoor klapt de bovenste laag boomstammen om en spoelen weg. De onderste laag boomstammen blijft intact.
2. De onderste loodrecht op de stroomrichting gelegen boomstam schuift weg, waardoor het onderste deel van de constructie het begeeft en de volledige constructie bezwijkt.
3. Het onderste deel van de constructie verplaatst in zijn geheel met de stroom mee, uiteindelijk klapt de bovenste rij boomstammen om en is de constructie bezweken.

Bezwijkmechanismen 1 en 2 komen alleen voor als de constructie voorwaarts gericht is. Bezwijkmechanisme 3 komt alleen voor als de constructie 180 graden gedraaid is. Een bijkomend nadeel bij bezwijkmechanismen 1 en 2 is dat de boomstammen om kunnen klappen. Deze kunnen hierbij een gevaar vormen voor de scheepvaart.

6.1.4 Bezwijkmechanisme opstelling variatie D

Bij opstelling variatie D zijn twee bezwijkmechanisme waar te nemen. Bij het eerste mechanisme spoelt een deel of de gehele constructie weg. Bij het tweede mechanisme verplaatst de onderste rij boomstammen zich iets uit elkaar, hierdoor zakt de constructie door waardoor een nieuwe evenwichtssituatie ontstaat met een aantal boomstammen op een rij. Bij het tweede bezwijkmechanisme wordt een hogere stroomsnelheid behaald.

6.1.5 Bezwijkmechanisme opstelling variatie E

Het bezwijkmechanisme bij opstelling variatie E is nagenoeg hetzelfde als het bezwijkmechanisme bij opstelling variatie A. Bij de grove bodem wordt wel een verschil opgemerkt, hier klappen de bomen soms ook om in plaats van dat ze weg glijden.

Ook hier is het omklappen van de boomstammen een ongunstige factor omtrent de veiligheid van de scheepvaart. Het gebruik van een zeer grove bodem in vergelijking met de diameter van de boomstammen wordt daarom afgeraden.

6.1.6 Bezwijkmechanisme opstelling variatie F

Bij opstelling variatie F bezwijken de bomen zich doordat ze wegschuiven. De smalle boomstammen leggen hierbij een veel kortere afstand af dan de bredere boomstammen.

Bij bezwijken van de constructies wilt men dat de boomstammen zoveel mogelijk op de plek waar ze geplaatst zijn blijven liggen, dit geldt meer voor smalle boomstammen.

6.2 Kritieke stroomsnelheid

In dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op de deelvraag: 'Wat is de kritieke stroomsnelheid bij verschillende opstellingen?'. Er wordt gekeken naar de kritieke snelheid en de snelheidsschommeling voor en achter de constructie.

6.2.1 Kritieke snelheid

Variatie A bereikt de hoogste kritieke stroomsnelheid zowel voor als achter de constructie en is op dat gebied de gunstigste constructie om toe te passen. Variatie C behaalt zowel voor als achter de laagste kritieke stroomsnelheid en is daarbij ongunstig om toe te passen.

Bij variatie C is wel een opmerkelijke reductie van de stroomsnelheid te zien als de snelheden voor en achter de constructie worden vergeleken. In een enkel geval is de snelheid achter de constructie zelfs negatief. Dit verschijnsel kan een positief effect hebben op bodembescherming en daardoor wordt deze constructie interessant. Het gebruik van wortels en een versteviging geeft voor de constructie de hoogste kritieke stroomsnelheid en wordt daarom aangeraden. De stroming wordt door de constructie enorm afgeremd, wat goed in Figuur 5.3 te zien is. Bij de constructie 180 graden gedraaid wordt een negatieve snelheid gevonden, verwacht wordt dat hier een neer achter de constructie ontstaat. Het gebruik van wortels heeft een negatieve invloed op de kritieke stroomsnelheid indien de constructie 180 graden gedraaid is, anders is het effect positief.

Bij het variëren van de doorsnede in een ronkhoekig- of ovaalvormige vorm is een verschil van orde 0.02 m/s waar te nemen in de kritieke stroomsnelheid. Bij alle proeven van variatie A behaalt de ovaalvormige doorsnede de hoogste kritieke snelheid voor de constructie. De kritieke snelheid bij variatie A achter de constructie en de overige proeven (variatie A, B en D) zowel voor en achter de constructie is geen positief dan wel negatief effect op de snelheid waar te nemen veroorzaakt door de doorsnedevorm. Door deze minimale invloeden van de vorm op de snelheid wordt aangeraden de doorsnede vorm van de boomstam intact te houden bij het gebruik als bodembescherming om zo de hoeveelheid arbeid te beperken.

Bij alle proeven waarin is gevarieerd in de aanwezigheid van takken (variatie A, B en D) is een verhoging van de kritieke stroomsnelheid te zien zowel voor als achter de constructie bij het gebruik van takken. Met uitzondering van proeven in variatie B 3-laags, hier wordt de kritieke snelheid juist verlaagd met het gebruik van takken. Het gebruik van takken heeft het grootste positieve effect bij variatie B 2-laags. Het gebruik van takken heeft dus bij de meeste variaties een gunstige invloed op de

kritieke stroomsnelheid. Er moet wel opgelet worden bij gelaagde constructie of dit nog steeds het geval is.

In proeven van variatie A en E is gevarieerd in de bodemruwheid. De grove zandbodem geeft een hogere kritieke stroomsnelheid in combinatie met het gebruik van takken. Zonder de takken is een fijne zandbodem beter ten behoeve van de kritieke stroomsnelheid voor zowel voor als achter de constructie. Bij de stenenbodem wordt de grootste kritieke stroomsnelheid bereikt. Deze bodem is alleen niet aanwezig in Nederland, waardoor dit effect in de werkelijkheid nooit bereikt zal worden. Het verschil in kritieke stroomsnelheid veroorzaakt door de bodem ligt aan beide kanten van de constructie tussen de 0.01 – 0.04 m/s.

Bij variatie B is het aantal lagen een variabele. Het gebruik van twee lagen is gunstig voor de kritieke stroomsnelheid voor de constructie in combinatie met takken en bij het gebruik van drie lagen is het gunstig zonder het gebruik van takken. Het effect op de kritieke stroomsnelheid ligt rond de 0.05 m/s voor de constructie. Achter de constructie is het effect van het gebruik van twee lagen in plaats van drie lagen met takken in de orde 0.13 - 0.19 m/s.

Bij variatie F wordt er gevarieerd in de lengte en de diameter van de boomstammen. Bij de lengte variatie is er bij smalle boomstammen zowel voor als achter geen effect op de kritieke stroomsnelheid. Bij brede boomstammen is het voor de constructie beter om korte boomstammen te gebruiken en achter de constructie is de kritieke stroomsnelheid het hoogst bij lange boomstammen. Het verschil ligt hierbij tussen de 0.01 en 0.02 m/s.

Bij de variatie in diameter is te zien dat het effect voor zowel lange als korte boomstammen positief is op de kritieke stroomsnelheid bij brede boomstammen. Uit deze resultaten komt dat het gebruik van korte brede boomstammen het beste resultaat oplevert. De verschillen zijn echter niet heel groot.

Proef Fa0010LB is in elke opzicht hetzelfde als Aa0010 met uitzondering van de dichtheid van de boomstammen. De boomstammen van variatie A hebben namelijk 4 maanden onder water gelegen terwijl dit bij boomstammen variatie F maar 8 dagen was (zie Bijlage 3: Dichtheden boomstammen)

De dichtheid van variatie A bedraagt 1272 kg/m³ en van F 1212 kg/m³. De kritieke snelheid van variatie A is 0.01 m/s lager dan die van variatie F voor de constructie. Achter de constructie behaalt A een kritieke snelheid die 0.04 m/s hoger is. Om een conclusie te kunnen geven over de invloed van de dichtheid zijn meer proeven nodig.

6.2.2 Schommeling snelheid

De snelheidsschommeling is bij de meeste proeven in de twee seconden voor bezwijken redelijk constant. Bij proeven uit variatie D zijn per meting verschillende kritieke snelheden gevonden. Het bezwijken van deze proef heeft onder andere te maken met de schommeling van de snelheid voor en achter de constructie.

Wat ook opvalt is dat bij de constructies bestaande uit één laag (variantie A, E en F) de standaarddeviatie en dus ook de snelheidsschommeling redelijk klein is. Dit komt waarschijnlijk doordat bij deze lage constructies de bomen nog weinig invloed heeft op de stroming ter hoogte van de EMS.

Bij experiment Fa0010KB is als enige mooi te zien dat de snelheid vlak voor het bezwijken bij alle vijf de testen opeens toeneemt, wat het bezwijken zou kunnen hebben veroorzaakt.

6.3 Turbulentie

In dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op de deelvraag: ‘Wat is de invloed van de verschillende schaalmodellen op de turbulentie?’

Over het algemeen is in de resultaten te zien dat de fluctuatiesintensiteit gemeten voor de constructie redelijk hoog is. Dit is te verklaren doordat ter hoogte van de EMS de stroming wordt beïnvloed door de constructie en hierdoor omhoog wordt gestuwd. Dit is ook goed te zien in Figuur 5.3. Bij Ab1010 is dit minder goed te zien, dit komt waarschijnlijk doordat de constructie erg laag is en de stroming dus redelijk constant blijft.

Achter de constructie is een goed verband te zien tussen de hoogte van de constructie en de gemeten fluctuatiesintensiteit. De fluctuatiesintensiteit is namelijk hoog vanaf de bodem, waar de constructie begint, tot iets boven de hoogte waar de constructie ophoudt. Bij Ab1010 is dit op 3.5 cm nog een beetje te zien, de hoogte van de constructie is hier ongeveer 2 cm. Bij Ca1040* is dit op 10.5 cm en de hoogte van deze constructie is dan ook ongeveer 9.5 cm. Bij de andere constructies klopt deze hypothese ook en wordt dus aangenomen dat de fluctuatiesintensiteit direct achter de constructie erg samenhangt met de hoogte van de constructie.

Bij experiment Db1020 0.3 m/s is bij de laatste meting op 15.5 cm een relatief hoge waarde van $r_u = 0.1238$ gevonden, dit is niet logisch en is mogelijk te verklaren doordat de dat dit de uiterste hoogte van de EMS is en het mogelijk is dat die af en toe een waarde boven water heeft gemeten en dus niet geldig is.

6.4 Verbanden voor boomstammen

In dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op de deelvraag: ‘Zijn er duidelijke verbanden te vinden die met een formule beschreven kunnen worden?’ De gevonden verbanden zijn weergegeven in Tabel 5.8.

6.4.1 Formule op basis van Izbash

Volgens het onderzoek van C. Çete en S. Haage (2016) kunnen de k_1 en k_2 waarden uit de formule voor de kritieke stroomsnelheid bij boomstammen (formule 2.2) verwaarloosd worden doordat de invloed hiervan ten opzichte van k_3 te verwaarlozen is. Door het variëren van de diameter en de lengte (proef variatie F) is een schatting te maken voor de k_1 -, k_2 - en k_3 -waarden doordat deze constant zijn in de proeven van variatie F. Hieruit volgt dat $k_1 d^2$, $k_2 dL$ en $k_3 L^2$ respectievelijk in de orde zijn van: 10^{-3} , 10^{-2} en 10^{-4} . Hieruit is te concluderen in tegenstelling tot de aanname in het eerder onderzoek, dat de invloed van k_2 de grootste invloed heeft op de kritieke stroomsnelheid.

In Tabel 5.9 en Tabel 5.10 is te zien dat de verbanden gevonden bij proef Aa0010 en variatie F niet de juiste uitkomst geven. De gevonden verbanden zijn dus nog niet correct. Ook hieruit is te concluderen dat de k_1 en k_2 niet te verwaarlozen zijn. Bij proef Ec0210 daarentegen geeft de snelheid bepaald met de formule wel een correcte waarde (afwijking van 4%), zie Tabel 5.11.

Door het meenemen van invloed van de turbulentie in de formule van Izbash is te zien dat de spreiding van de k_3 waarde per variatie verkleind wordt. Dit is gunstig aangezien het de nauwkeurigheid van het resultaat vergroot.

Bij stenen wordt de kritieke stroomsnelheid beschreven met formule (6.1). Hierin is α de evenredigheidsconstante en voor stenen geldt: $\alpha = 1.2$ (Schierck & Verhagen, 2000). Voor de

boomstammen ligt deze waarde tussen $\alpha = 1.1$ tot $\alpha = 1.9$. Dit is in dezelfde orde van grootte als stenen.

$$u_c = \alpha \sqrt{2\Delta g d}, \quad \alpha = \sqrt{\frac{1}{2k_3}} \quad (6.1)$$

6.4.2 Formule op basis van Shields

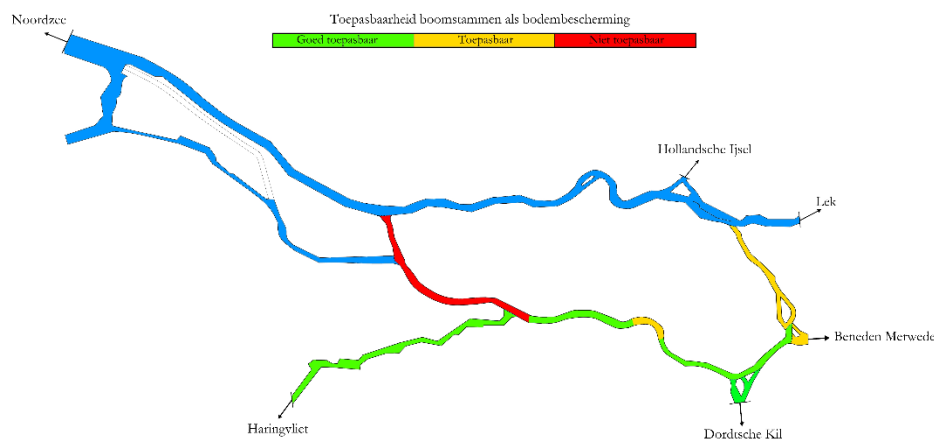
In Figuur 5.2 is te zien dat bij een bepaalde diameter niet één Shields parameter van toepassing is, wat wel het geval is voor stenen. De Shields parameter hangt af van de soort variatie, er is te zien dat verschillende proeven uit dezelfde soort variatie dichter bij elkaar liggen. Ook lijken alle proeven met dezelfde diameter op een lijn te liggen met een lineair verband.

De Shields parameter voor de uitgevoerde proeven ligt tussen de 0.006 tot 0.054. Bij steen met een diameter groter dan 7 mm geldt dat de Shields parameter gelijk is aan 0.055 (Schierck & Verhagen, 2000).

6.5 Vertaling naar de werkelijkheid

In dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op de deelvraag: ‘Hoe gedraagt een schaalmodel zich in de werkelijkheid?’

Als er gekeken wordt naar de berekende stroomsnelheden (Tabel 5.2), dan kan men concluderen dat voor het overgrote deel van dit stroomgebied afgezonken houten boomstammen toepasbaar zijn. Er zijn echter plekken waar dit riskant is. Onderstaande afbeelding laat zien waar boomstammen toepasbaar zijn.



Figuur 6.1: Toepasbaarheid boomstammen in het stroomgebied

Echter zegt Rijkswaterstaat (Sieben, 2016) dat er rekening gehouden moet worden met stroomsnelheden die kunnen oplopen tot 2 m/s in de rivieren. Deze laatstgenoemde stroomsnelheid is dermate hoog dat volgens dit onderzoek geen enkele constructie zou blijven staan.

6.6 *Toepassing van boomstammen als bodembescherming*

In dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op de hoofdvraag van dit onderzoek: 'In hoeverre kunnen boomstammen toegepast worden als bodembescherming om erosie en ontgronding te voorkomen.'

Uit dit onderzoek komt naar voren dat boomstammen kunnen worden toegepast om de bodem mee te beschermen op basis van de kritieke stroomsnelheid en de turbulentie. Wel moet er voor elke situatie gekeken worden wat de maximale stroomsnelheid in de rivier is en in welke vorm de boomstammen dan moeten worden toegepast.

Wat op valt is dat de variaties A, E en F de hoogste kritieke stroomsnelheid hebben maar een lage turbulentie. Echter zijn dit de constructies met maar één laag. Voor de constructies met meer lagen valt variatie D op, deze variatie heeft een redelijk hoge kritieke stroomsnelheid en daarbij is ook de turbulentie voor de constructie hoog. Ook is deze variatie goed uitvoerbaar, zonder verbindingen kunnen de bomen evenwijdig aan de stroming in de rivier geplaatst worden. Constructie variatie C valt op als gekeken wordt naar het verlagen van de stroomsnelheid achter de constructie.

7. Discussie & Aanbeveling

In dit hoofdstuk wordt gekeken naar de nauwkeurigheid van de resultaten en wat de resultaten eventueel heeft beïnvloed. Op basis hiervan wordt besproken wat in een vervolgonderzoek beter zou kunnen.

7.1 Stroomgoot

De proeven zijn allemaal uitgevoerd in de twee laboratorium stroomgoten in Stevinlab III op de faculteit civiele techniek van de TU Delft. Het werken in twee goten neemt een onnauwkeurighedsfactor met zich mee, aangezien de stroomgoten niet identiek aan elkaar hoeven te zijn.

De hoogte van het water waarop de boomstamconstructies bezweken bij de proeven zit rond de 20 à 25 cm. Om de nauwkeurigheid van de resultaten te vergroten zal in een vervolgonderzoek gewerkt moeten worden met een constante waterhoogte.

De breedte van de stroomgoten waar de proeven in zijn gedaan is 20 cm. Wandwrijving heeft een verwaarloosbare invloed op de metingen als de hoogte van het water $\frac{1}{3}$ van de breedte bedraagt (Stuifbergen, 1981). Dat is in dit onderzoek niet het geval.

Een ander nadeel van de smalle stroomgoot is dat er een aantal proeven, namelijk de gedraaide opstelling van variatie B niet uitgevoerd konden worden omdat de opstellingen niet pasten. Er wordt aangeraden om deze proeven wel uit te voeren in een vervolgonderzoek.

C. Çete en S. Haage (2016) hebben de schuif achter in de stroomgoot standaard op 15 cm hoogte gezet. Als de constructie niet bezweek hebben zij de schuif verder omlaag gedraaid totdat de constructie wel bezweek. Vervolgens is de bijbehorende hoogte niet genoteerd. In dit onderzoek is de schuif op een standaard hoogte van 7.5 cm gezet, zodat de constructie altijd bezwijkt. Bij het vergelijken van de resultaten van het huidige onderzoek met de resultaten uit het vorige onderzoek kan dit een verschil veroorzaken.

Bij het verhogen van de snelheid in de stroomgoot is langzaam aan het wiel gedraaid, om betere resultaten te verkrijgen dient dit automatisch te worden gedaan (bv. een machine).

Voor nauwkeurigere resultaten in een vervolgonderzoek wordt aangeraden een bredere stroomgoot te gebruiken.

7.2 Metingen EMS

De stroomsnelheid is gemeten met behulp van twee EMS'en. Deze EMS'en zijn op een afstand van 10 cm voor en achter de constructie geplaatst. Echter is een EMS zo groot dat de stroming wordt verstoord en door de geringe afstand op de constructies zorgt dit voor een onnauwkeurigheid van de meting.

Ook wordt de snelheid die vlak voor de constructie gemeten wordt, beïnvloedt door de constructie. Hierdoor is de gemeten snelheid niet hetzelfde als de snelheid op deze hoogte op andere plekken in de stroomgoot. Er wordt aangeraden om ook de snelheid ver voor de constructie te bepalen.

De spreiding van de EMS is groot, zie Tabel 5.1, wat de nauwkeurigheid van het onderzoek verkleint.

Om betere resultaten te verkrijgen wordt aangeraden om alle proeven uit te voeren met een EMS waarbij 10 V overeenkomt met 1 m/s (in plaats van 5 m/s of 2.5 m/s). Ook zou een laser gebruikt kunnen worden om de stroomsnelheid te meten. Een bijkomend voordeel hiervan is dat de stroming niet verstoord wordt door het meetapparaat.

De EMS van goot 2 heeft 20 metingen per seconde gemaakt in plaats van 1000, wat de nauwkeurigheid verkleint. De metingen zijn echter nog wel relevant en zijn daarom gebruikt in dit onderzoek.

7.3 *Bodem*

De bodemplaten zijn bij het testen van de bomen uit variatie C inclusief wortels beschadigd. Hierdoor varieert de bodemruwheid iets, terwijl het als constante is aangenomen.

De bodemplaten in dit onderzoek zijn ijzeren platen waar zandkorrels op vastgelijmd zijn. Deze platen stellen een vaste bodem voor, waarbij de enige interactie tussen de bodem en de boomstammen bestaat uit wrijving. Voor realistischere resultaten wordt aangeraden om bij een vervolgonderzoek gebruik te maken van een losse bodem waar boomstammen zich mogelijk anderszins in kunnen graven.

Bij het schalen naar de werkelijkheid is geen rekening gehouden met het schalen van de ruwheid van de bodem. Om hier meer informatie over te krijgen, moeten proeven op een grotere schaal uitgevoerd worden.

7.4 *Boomstammen*

Het werken op een grotere schaal vergroot de nauwkeurigheid van dit onderzoek. Het wordt dus aangeraden om met grotere bomen te werken in een grotere stroomgoot.

Ook is in dit onderzoek gewerkt met een tropisch hardhout, zodat de boomstammen van zichzelf al zonken. In een vervolgonderzoek zou gewerkt kunnen worden met hetzelfde soort hout als waar Rijkswaterstaat eventueel mee wil gaan werken.

7.5 *Stroomgebied*

In dit onderzoek is een vereenvoudigde weergave van de stroomsnelheid in het stroomgebied gemaakt. De stroomsnelheden die uit de berekeningen in Bijlage 1: Informatie stromingsgebied, volgen zijn niet nauwkeurig omdat hierbij geen rekening wordt gehouden met schuifspanning aan de oeverzijden en bodem, tevens wordt het oppervlak (m.u.v. de Dordtsche Kil en de Lek) als een rechthoek aangenomen. Belangrijk is dat de stroomsnelheid ter hoogte van de bodem van de rivier gemeten wordt, omdat de kritieke stroomsnelheid van de boomstammen hier bekend is.

Ook is de invloed van het getij bepaald uit de meetgegevens van een beperkt aantal dagen en hoeft dus niet maatgevend te zijn voor alle omstandigheden. De resultaten weergegeven in Tabel 2.1 dienen enkel als een schatting om te kunnen kijken waar de boomstammen eventueel toegepast zouden kunnen worden op basis van de stroomsnelheid. Aanvullende metingen in het stroomgebied zijn nodig om hier meer over te kunnen zeggen.

7.6 *Turbulentie*

Turbulentie is in dit onderzoek alleen berekend in de u-richting, de richting evenwijdig aan de stroomrichting. Het zou een toevoeging zijn om de turbulentie in de andere richtingen te beschouwen. Op deze manier kan meer inzicht verkregen worden of het erosieproces versterkt wordt of juist tegengegaan.

7.7 *Benadering kritieke stroomsnelheid met formules*

De benadering van de kritieke stroomsnelheid voor boomstammen is nog niet helemaal correct, zoals in Tabel 5.9 en Tabel 5.10 duidelijk wordt. Deze foutieve benadering wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de verwaarlozing van een aantal constanten in de formule (k_1 en k_2). In vervolgonderzoek zouden deze constanten bepaald kunnen worden door bij de proeven te variëren in de lengte, diameter en dichtheid van de boomstammen.

Ook dient bij de methode van Shields de stroming uniform te zijn. Als dit niet het geval is moet een correctiefactor toegepast worden. Dit is in dit onderzoek niet gedaan, waardoor de bepaalde formule op basis van Shields tot foutieve stroomsnelheden kan leiden.

7.8 *Overig vervolgonderzoek*

Rijkswaterstaat wil de boomstammen gaan gebruiken in ontgrondingskuilen. In een vervolgonderzoek zou gekeken kunnen worden hoe de constructies zich gedragen in kuilen.

Ook is het interessant om meer informatie te verkrijgen over het verschil in ruwheid tussen het water als er geen bomenconstructie is geplaatst en als dat wel het geval is (Sieben, 2016). Dit zou als volgt kunnen:

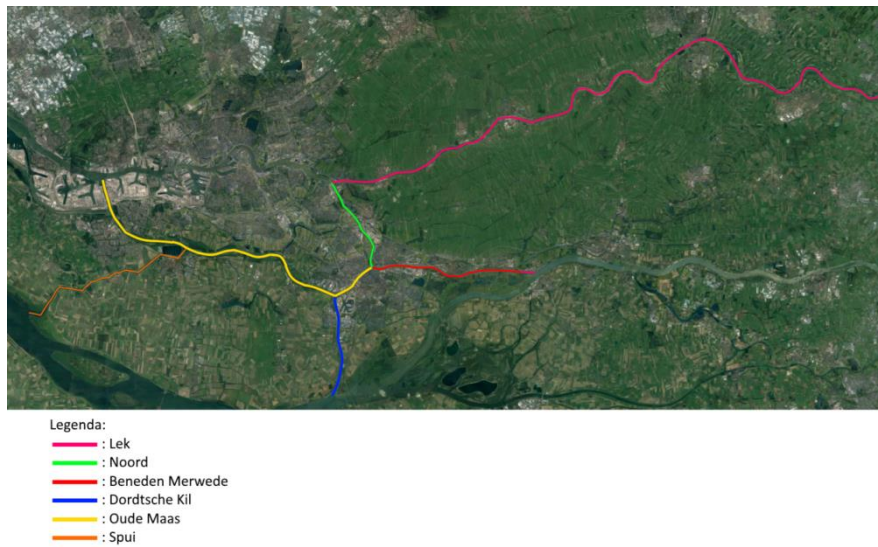
1. Bepaal het maximale debiet waarbij alle bomenconstructies nog niet bezwijken.
2. Laat door een goot zonder bomen dit maximale debiet stromen en noteer de waterstand.
3. Noteer de waterstand bij dit debiet voor alle andere constructie variaties.
4. Kies de waterstand bij 2) als referentie.
5. Bepaal het waterstandverschil voor alle constructies ten opzichte van het referentieniveau. Dit waterstandsverschil is het verschil in opstuwning.
6. Reken het verschil in waterstand bij 5) om in een verschil in ruwheid.

8. Literatuur

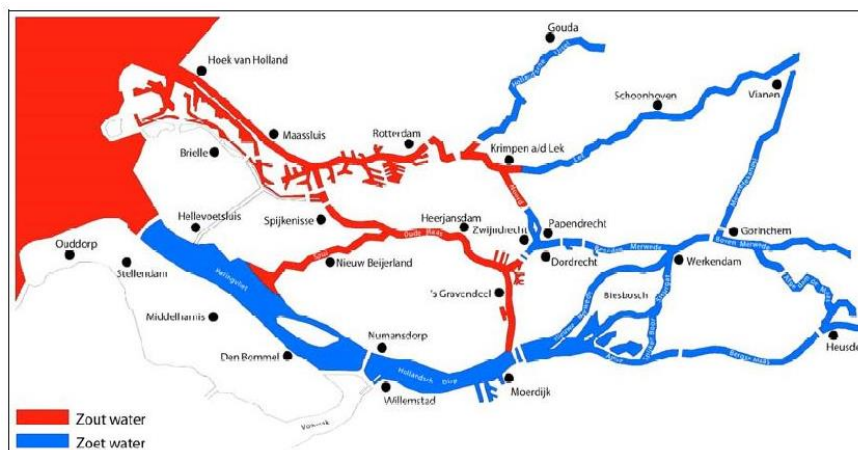
- Andrew, P. (2006). *Design guideline for the reintroduction of wood into Australian streams*. Australian Government. Land & Water Australia.
- Çete, C. & Haage, S. (2016). *Bodembescherming met behulp van boomstammen*. TU Delft, Civiele techniek.
- Rijkswaterstaat (2004). *Huidige situatie en autonome ontwikkeling Rijn-Maasmonding*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Nota
- Rijkswaterstaat. Rijkswaterstaat start proef met tegengaan daling van de rivierbodem. www.helpdeskwater.nl/actueel/@42655/rijkswaterstaat/. Geraadpleegd: 21 april 2016
- Rijkswaterstaat. Rivierhout. www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/waterkwaliteit/maatregelen-waterkwaliteit/herstel-leefgebied/rivierhout/index.aspx#vp-article71763. Geraadpleegd: 22 april 2016
- Rijkswaterstaat. Vaarwegenoverzicht. www.rijkswaterstaat.nl/water/vaarwegenoverzicht. Geraadpleegd: 16 september 2016
- Schiereck, G.J. & Verhagen, H. (2000). *Introduction to bed, bank and shore protection*. Delft Academic Press.
- Schiereck, G.J. (1993). *Introduction to bed, bank and shore protection*. Tu Delft. Department Hydraulic Engineering.
- Schlichting, H. (1968). *Boundary Layer Theory*. McGraw-Hill, Southern Methodist University.
- Sieben, A (2016). Rijkswaterstaat-adviseur van de dienst Water, Verkeer en Leefomgeving. Mondelinge overdracht. Geraadpleegd: 6 oktober 2016.
- Sieben, A. (2016). *Hout in rivieren ontgrondingskuilen*. Rijkswaterstaat. Ministerie Infrastructuur en Milieu. Powerpoint.
- Stuifbergen, J.A.M. (1981). *Reststroomsnelheidsmetingen*. Technische Hogeschool Delft, Civiele techniek, vakgroep vloeistofmechanica.
- Torfs, P. & Hoitink, A. (2011). *Advanced environmental hydraulics*. Wageningen University.
- Verhagen, H. J. (2016). *Modelboomstammen*. Tu Delft, Civiele techniek
- Visser, M. (1988). *Energiedissipatie van monochromatische zeegolven in de turbulente bodemgrenslaag*. Koninklijk Nederlands meteorologisch instituut.

9. Bijlage

Bijlage 1: Informatie stromingsgebied



Figuur 9.1: Overzicht stroomgebied



Figuur 9.2: Verzilting bij een lage afvoer en hoge zeewaterstand (Rijkswaterstaat, 2004)

Tabel 9.1: Maximale snelheid vloed en ebstroom bij verschillende debieten van de Rijn (Rijkswaterstaat, 2004)

Afvoer Rijn (m^3/s)	Station	Maximale vloedstroom (m/s)			Maximale ebstroom (m/s)			
		800	2200	6000	800	2200	6000	
	Rivier							
	Schoonhoven	Lek	0.41	0.20	-0.82	0.46	0.65	1.11
	Goidschalxoord	Oude Maas	0.59	0.46	0.44	0.64	0.74	0.76
	Dordrecht	Oude Maas	0.19	0.12	-0.46	0.31	0.56	0.90
	Oud Beijerland	Spui	0.73	0.69	0.78	0.76	0.83	0.58
	's Gravendeel	Dordtsche Kil	0.78	0.80	1.03	0.70	0.71	0.16

Tabel 9.2: Maximaal vloed en eb debiet bij verschillende debieten van de Rijn (Rijkswaterstaat, 2004)

Afvoer Rijn (m ³ /s)	Rivier	Maximaal vloeddebiet (m ³ /s)			Maximaal eb debiet (m ³ /s)		
		800	2200	6000	800	2200	6000
Splitsingspunt	Rivier						
Werkendam	Beneden-Merwede	527	123	-1260	668	909	1769
Dordrecht (oost)	Beneden-Merwede	612	129	-914	718	1017	1865
	Noord	1049	979	1012	935	1032	782
	Oude Maas	308	149	-1049	580	1084	1904
Dordrecht (west)	Oude Maas (oost)	465	330	-826	670	1191	1955
	Dordtsche Kil	1882	1956	2595	1622	1669	387
	Oude Maas (west)	1528	1199	824	1423	1663	1698
Willemsdorp	Dordtsche Kil	1851	1932	2518	1596	1641	302
Beerenplaat	Oude Maas (oost)	1528	1191	1158	1464	1726	1837
	Spui	767	745	854	710	791	553
	Oude Maas (west)	2295	1932	1923	2165	2516	2342
Spui/Haringvliet	Spui	712	730	689	657	679	813

Tabel 9.3: Breedte en diepte van rivieren binnen het stroomgebied (Rijkswaterstaat, 2016)

Rivier	Breedte (m)	Diepte (m)	Diepte eb (m)	Diepte vloed (m)
Beneden-Merwede	245	-5.90 NAP	5.95	6.80
Noord	174 tot 345	-10 tot -4.80 NAP	10.05 – 4.85	10.90 – 5.70
Oude Maas	180 tot 340	-9.45 NAP (gem)	9.15	10.45
Dordtsche Kil	260	-10.00 NAP	10.05	10.90
Spui	130 tot 255	-5.55 NAP (gem)	5.70	6.10

Tabel 9.4: Verschillende oppervlakten van rivieren bij hoog en laag water. Bepaald met hulp van

Versie:

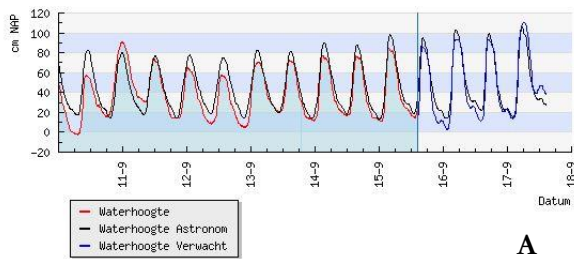
Rivier:	A _{eb.1}	A _{eb.2}	A _{eb.3}	A _{eb.4}	A _{vloed.1}	A _{vloed.2}	A _{vloed.3}	A _{vloed.4}
Beneden-Merwede	1457.75				1666			
Noord	34567.25	1748.7	1673.25	843.9	3760.5	1896.6	1966.5	991.8
Oude Maas	3111	1647			3553	1881		
Dordtsche Kil	2613				2834			
Spui	1453.5	741			1555.5	793		

Tabel 9.5: Stroomsnelheden bepaald aan de hand van tabel 10.2 en 10.4

Afvoer Rijn (m ³ /s)	Splitsingspunt	Rivier	Maximale vloedstroom (m/s)			Maximale ebstroom (m/s)		
			800	2200	6000	800	2200	6000
Werkendam	Dordrecht (oost)	Beneden-Merwede	0.36	0.08	-0.86	0.40	0.55	1.06
		Beneden-Merwede	0.42	0.09	-0.63	0.43	0.61	1.12
Dordrecht (west)	Dordrecht (oost)	Noord (1)	0.30	0.28	0.29	0.25	0.27	0.21
		Noord (2)	0.60	0.56	0.58	0.49	0.54	0.41
		Noord (3)	0.63	0.59	0.60	0.48	0.52	0.40
		Noord (4)	1.24	1.16	1.20	0.94	1.04	0.79
		Oude Maas (1)	0.19	0.09	-0.64	0.16	0.31	0.54
		Oude Maas (2)	0.10	0.05	-0.34	0.31	0.58	1.01
		Oude Maas (oost) (1)	0.15	0.11	-0.27	0.19	0.34	0.63
		Oude Maas (oost) (2)	0.28	0.20	-0.50	0.36	0.63	1.04
		Dordtsche Kil	0.72	0.75	0.99	0.57	0.59	0.14
		Oude Maas (west) (1)	0.49	0.39	0.26	0.40	0.47	0.48
Willemsdorp Beerenplaat	Dordrecht (west)	Oude Maas (west) (2)	0.93	0.73	0.50	0.76	0.88	0.90
		Dordtsche Kil	0.71	0.74	0.96	0.56	0.58	0.11
		Oude Maas (oost) (1)	0.49	0.38	0.37	0.41	0.49	0.52
		Oude Maas (oost) (2)	0.93	0.72	0.70	0.78	0.92	0.98
		Spui (1)	0.53	0.51	0.59	0.46	0.51	0.36
		Spui (2)	1.04	1.01	1.15	0.90	1.00	0.70
		Oude Maas (west) (1)	0.70	0.62	0.62	0.61	0.71	0.66
		Oude Maas (west) (2)	1.31	1.17	1.17	1.15	1.34	1.25
Spui/Haringvliet	Willemsdorp Beerenplaat	Spui (1)	0.49	0.50	0.47	0.42	0.44	0.52
		Spui (1)	0.96	0.99	0.93	0.83	0.86	1.03

Waterhoogte: 25 cm NAP

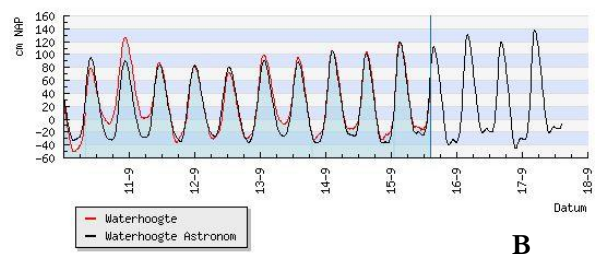
15-9-2016 - 14:30 uur - Dordrecht



A

Gemeten en Astronomische waterhoogte: 75 cm NAP

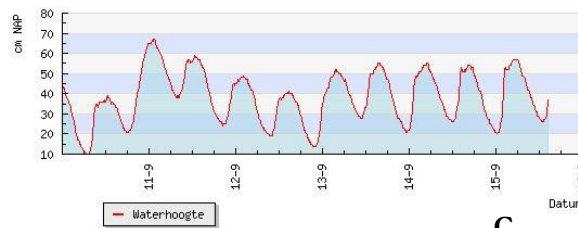
15-9-2016 - 14:30 uur - Spijkenisse



B

Gemeten waterhoogte: 37 cm NAP

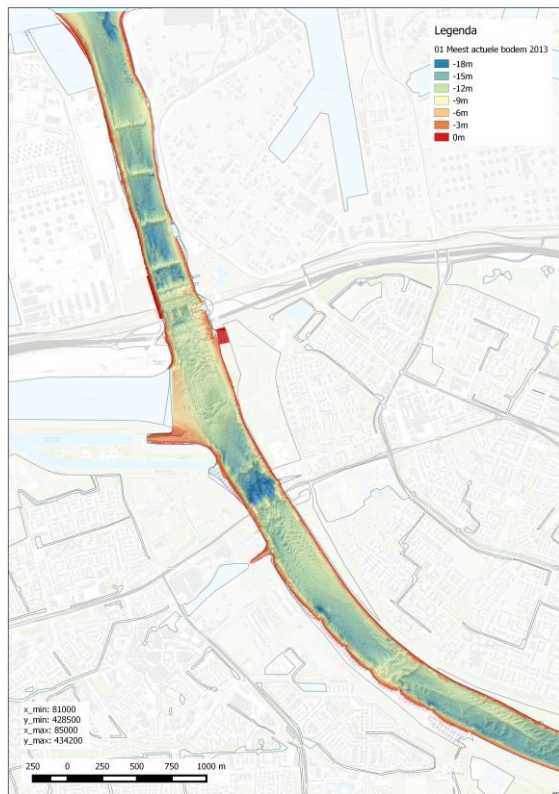
15-9-2016 - 14:30 uur - Bernisse Zuidland



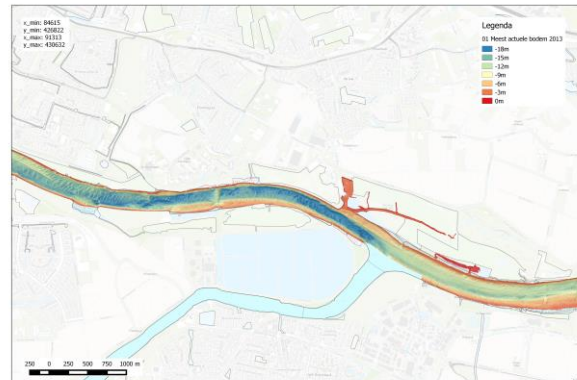
C

Figuur 9.3: A) Waterhoogte Noord- Beneden Merwede- Oude Maas, B) Waterhoogte Oude Maas, C) Waterhoogte Spui (Rijkswaterstaat, 2016)

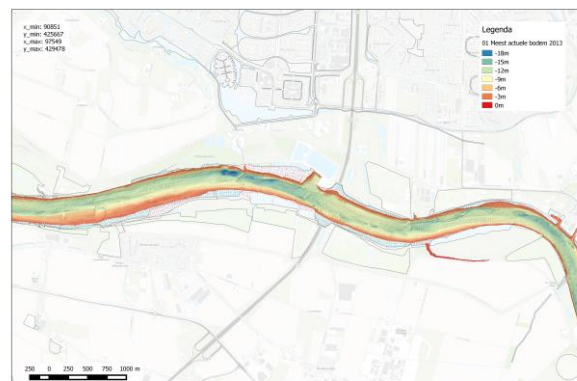
Concept jaarrapportage Oude Maas 2013 - laag 1: bodemligging



Concept jaarrapportage Oude Maas 2013 - laag 1: bodemligging



Concept jaarrapportage Oude Maas 2013 - laag 1: bodemligging



Figuur 9.4: Bodemligging Oude Maas 2013

Bijlage 2: Formule Izbash andere doorsnede

Rondhoekige doorsnede:

$$F_{sleep} = \frac{1}{2} C_{sleep} * p_w * u^2 * n(d^2 - 2 * a^2)$$

$$F_{schuif} = \frac{1}{2} C_{schuif} * p_w * u^2 * L * n(3(d - 2a) + 4a\sqrt{2})$$

$$F_{lift} = \frac{1}{2} C_{lift} p_w u^2 n d L$$

$$\sum M_{lijn A} = 0 \rightarrow F_{sleep} * \frac{1}{2} d + F_{schuif} * \frac{2}{3} d + F_{lift} * \frac{1}{2} L = W * \frac{1}{2} L$$

$$\frac{1}{4} k_1 p_w u^2 n d(d^2 - 2 * a^2) + \frac{1}{3} k_2 p_w u^2 L n(3(d - 2a) + 4a\sqrt{2}) + \frac{1}{4} k_3 p_w u^2 n d L^2 = \frac{1}{2} n(p_s - p_w) g L^2 (d^2 - 2a^2)$$

$$u^2 = \frac{p_s - p_w}{p_w} \frac{g L^2 (d^2 - 2a^2)}{\frac{1}{2} k_1 d(d^2 - 2 * a^2) + \frac{2}{3} k_2 L (3(d - 2a) + 4a\sqrt{2}) + \frac{1}{2} k_3 d L^2}$$

Ovaalvormige doorsnede:

$$F_{sleep} = \frac{1}{2} C_{sleep} * p_w * u^2 * n((d - 2b)^2 + b^2\pi)$$

$$F_{schuif} = \frac{1}{2} C_{schuif} * p_w * u^2 * L * n(3(d - 2b) + 2b\pi)$$

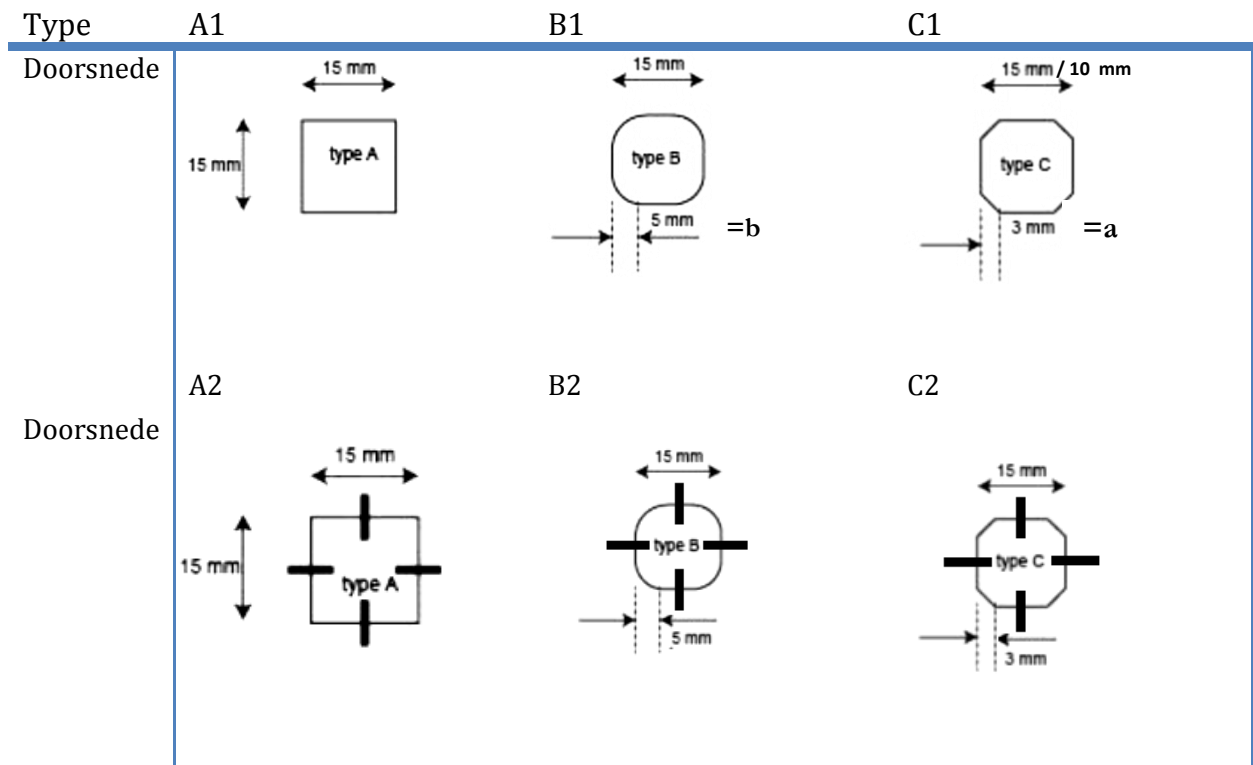
$$F_{lift} = \frac{1}{2} C_{lift} p_w u^2 n d L$$

$$\sum M_{lijn A} = 0 \rightarrow F_{sleep} * \frac{1}{2} d + F_{schuif} * \frac{2}{3} d + F_{lift} * \frac{1}{2} L = W * \frac{1}{2} L$$

$$\frac{1}{4} k_1 p_w u^2 n d((d - 2b)^2 + b^2\pi) + \frac{1}{3} k_2 p_w u^2 L n(3(d - 2b) + 2b\pi) + \frac{1}{4} k_3 p_w u^2 n d L^2 = \frac{1}{2} n(p_s - p_w) g L^2 ((d - 2b)^2 + b^2\pi)$$

$$u^2 = \frac{p_s - p_w}{p_w} \frac{g L^2 ((d - 2b)^2 + b^2\pi)}{\frac{1}{2} k_1 d((d - 2b)^2 + b^2\pi) + \frac{2}{3} k_2 L (3(d - 2b) + 2b\pi) + \frac{1}{2} k_3 d L^2}$$

Bijlage 3: Dichtheden boomstammen



Figuur 9.5: Modelbomen en hun doorsnede

Tabel 9.6: Dichtheden per doorsnede

Doorsnede	Lengte (mm)	Diameter (mm)	Datum onder water	Gemeten datum	Dichtheid (kg/m ³)
A1	180	15	24/04/16	19/09/16	1269.5
A2	180	15	24/04/16	19/09/16	1259.3
B1	180	15	24/04/16	19/09/16	1264.7
B2	180	15	24/04/16	19/09/16	1268.1
C1	180	15	24/04/16	19/09/16	1272.4
C2	180	15	24/04/16	19/09/16	1264.1
C1	180	15	27/09/16	04/10/16	1212.3
C1	150	15	27/09/16	04/10/16	1215.6
C1	180	10	27/09/16	04/10/16	1234.3
C1	150	10	27/09/16	04/10/16	1247.6

Bijlage 4: Bepaling ruwheid zand

In Tabel 9.7: Zandkorrelverdeling is de zandkorrelverdeling van de gebruikte ruwheidsplaten te zien. Bij de grove zandbodem zit ongeveer 95 massaprocent bij zandkorrels met een diameter van 0.25 – 0.8 mm. De grootste hoeveel, 52.8%, bestaat uit korrels van 0.5 - 0.9 mm.

Bij het fijne zand zit ongeveer 5 massaprocent bij zandkorrels met een diameter van 0.112 - 0.355 mm. De grootste hoeveelheid fijn zand (35.7%) bestaat uit korrels van 0.212 - 0.25 mm.

Op de zandplaten is één laag zand vastgelijmd, waardoor de ruwheid overeenkomt met de nominale diameter, deze wordt met vergelijking (10.1) en Tabel 9.7 berekend. Hieruit komt voor het grove zand een k-waarde van 0.448 mm en voor het fijne zand een k-waarde van 0.193 mm.

$$d_n = k = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{10} \frac{4}{3} \pi * \left(\frac{1}{2} \text{zeefmaat}_i\right)^3 * \frac{\text{massa}\%_i}{100}} \quad (10.1)$$

Tabel 9.7: Zandkorrelverdeling

Nummer	Zeef maat (mm)	Gewicht (gr)	massa %	Gewicht (gr)	
				Grof zand	Fijn zand
1	1	2.45	1.175173	0.32	0.175824
2	0.9	7.76	3.72218	0.12	0.065934
3	0.8	22.18	10.63891	0.25	0.137363
4	0.5	110.05	52.78684	2.32	1.274725
5	0.355	52.45	25.15829	5.06	2.78022
6	0.25	12.49	5.990982	26.1	14.34066
7	0.212	0.67	0.321374	65.04	35.73626
8	0.18	0.27	0.129509	52.81	29.01648
9	0.112	0.11	0.052763	25.6	14.06593
10	Overig	0.05	0.023983	4.38	2.406593
	Totaal:	208.48		182	

Bijlage 5: Uitvoering proeven

Tabel 9.8: Informatie proefuitvoering

Proef	Uitvoering	Goot 1	Goot 2	Frequentie EMS	Voltage EMS (Voor constructie)	Voltage EMS (Achter constructie)
Variatie A						
Aa0010	5x Uitgevoerd	X		0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Aa0110	5x Uitgevoerd	X		0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Aa1010	5x Uitgevoerd	X		0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Aa1110	5x Uitgevoerd	X		0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Ab0010	5x Uitgevoerd	X		0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Ab0110	5x Uitgevoerd	X		0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Ab1010	5x Uitgevoerd	X		0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Ab1110	5x Uitgevoerd	X		0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Variatie B						
Ba0020	5x Uitgevoerd		X	0.05 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Ba0021	Niet uitgevoerd					
Ba0030	5x Uitgevoerd		X	0.05 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Ba0031	Niet uitgevoerd					
Ba1020	10x Uitgevoerd		X	0.05 s ⁻¹ 0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s 10 V \triangleq 1 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s 10 V \triangleq 1 m/s
Ba1021	Niet uitgevoerd					
Ba1030	5x Uitgevoerd		X	0.05 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Ba0031	Niet uitgevoerd					
Bb0020	5x Uitgevoerd		X	0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Bb0021	Niet uitgevoerd					
Bb0030	5x Uitgevoerd		X	0.05 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Bb0031	Niet uitgevoerd					
Bb1020	5x Uitgevoerd		X	0.05 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Bb1021	Niet uitgevoerd					
Bb1030	5x Uitgevoerd		X	0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 1 m/s	10 V \triangleq 1 m/s
Bb0031	Niet uitgevoerd					
Variatie C						
Ca1040	5x Uitgevoerd	X		0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Ca1042	5x Uitgevoerd	X		0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Ca1040*	5x Uitgevoerd	X		0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Ca1042*	5x Uitgevoerd	X		0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Ca1040*V	5x Uitgevoerd	X		0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Ca1040V	5x Uitgevoerd	X		0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Variatie D						
Da0020	5x Uitgevoerd	X		0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Da1020	5x Uitgevoerd	X		0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Db0020	5x Uitgevoerd	X		0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Db1020	5x Uitgevoerd	X		0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
				0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Variatie E						
Ec0010	5x Uitgevoerd	X		0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Ec0110	5x Uitgevoerd	X		0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s
Ec0210	5x Uitgevoerd	X		0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 5 m/s	10 V \triangleq 2.5 m/s

Variatie F

Fa0010KB	5x Uitgevoerd	X	0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 1 m/s	10 V \triangleq 1 m/s
Fa0010KS	5x Uitgevoerd	X	0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 1 m/s	10 V \triangleq 1 m/s
Fa0010LB	5x Uitgevoerd	X	0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 1 m/s	10 V \triangleq 1 m/s
Fa0010LS	5x Uitgevoerd	X	0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 1 m/s	10 V \triangleq 1 m/s

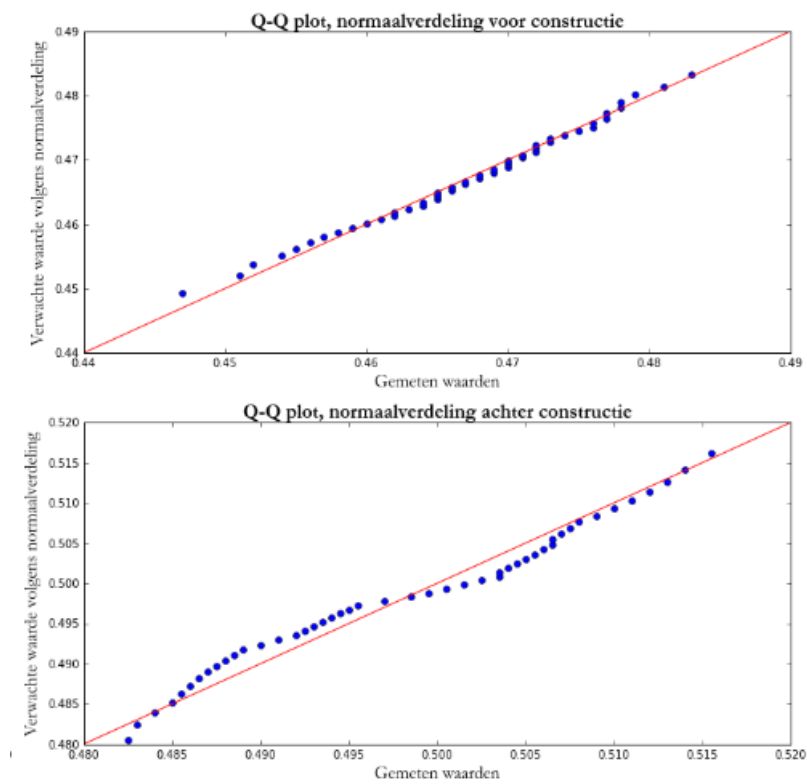
Snelheidsprofiel

Variatie A 0.3 m/s	1x Uitgevoerd	X	0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 1 m/s	10 V \triangleq 1 m/s
Variatie A 0.2 m/s	1x Uitgevoerd	X	0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 1 m/s	10 V \triangleq 1 m/s
Variatie B 0.3 m/s	1x Uitgevoerd	X	0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 1 m/s	10 V \triangleq 1 m/s
Variatie B 0.2 m/s	1x Uitgevoerd	X	0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 1 m/s	10 V \triangleq 1 m/s
Variatie C 0.3 m/s	1x Uitgevoerd	X	0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 1 m/s	10 V \triangleq 1 m/s
Variatie C 0.2 m/s	1x Uitgevoerd	X	0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 1 m/s	10 V \triangleq 1 m/s
Variatie D 0.3 m/s	1x Uitgevoerd	X	0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 1 m/s	10 V \triangleq 1 m/s
Variatie D 0.2 m/s	1x Uitgevoerd	X	0.001 s ⁻¹	10 V \triangleq 1 m/s	10 V \triangleq 1 m/s

Bijlage 6: Normaalverdeling

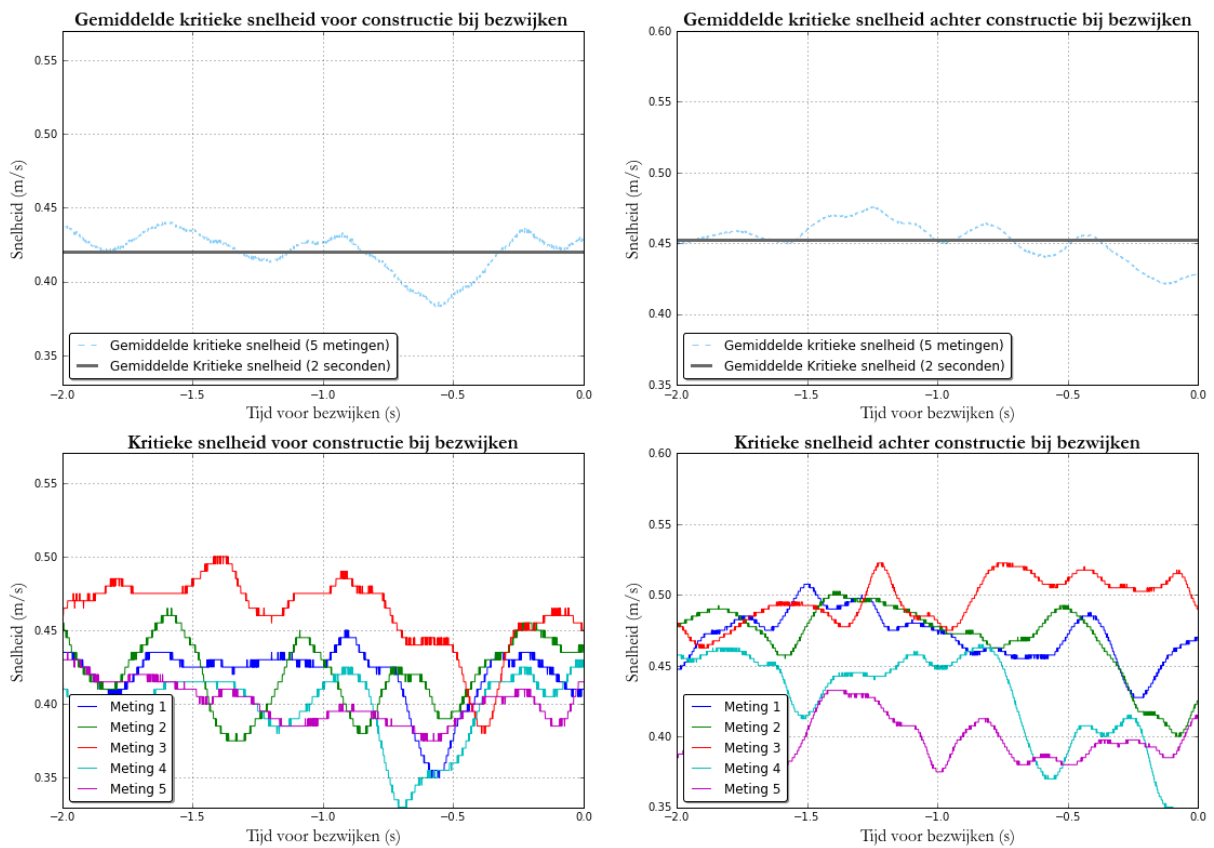
De data verkregen van de EMS is een normaalverdeling indien bij het maken van een Q-Q plot de waarden op een lijn van 45 graden komen te liggen. In Figuur 9.6 is een Q-Q plot te zien voor één opstelling. Voor alle metingen wordt de 'Root mean square error (RMSE)' van de data met de rode lijn berekend en vergeleken met de gemiddelde kritieke stroomsnelheid. Zie vergelijking (10.1) Deze waarde ligt voor alle constructies tussen de 2% -15%. Hieruit volgt dat de data inderdaad beschreven kan worden volgens normaalverdeling.

$$RMSE_{\%} = \frac{RMSE}{u_c} * 100\% \quad (10.1)$$

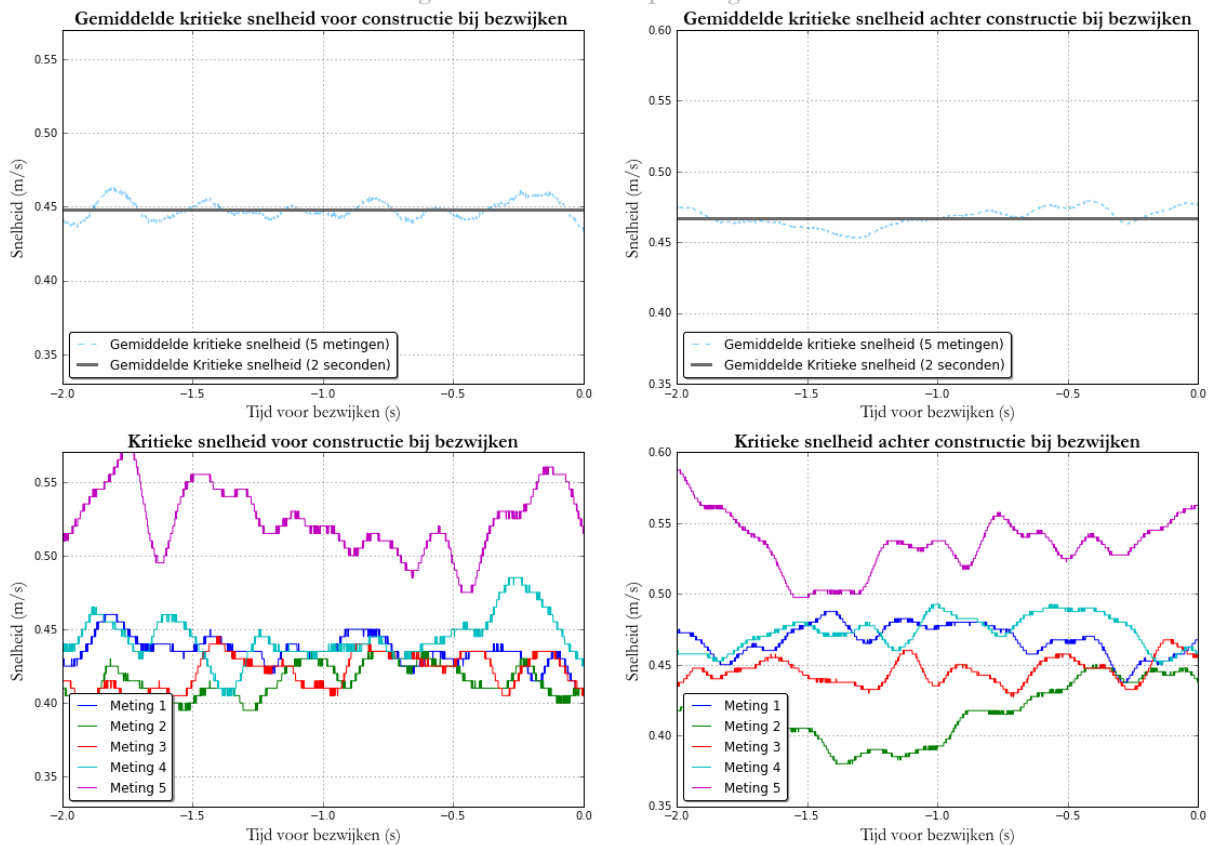


Figuur 9.6: Q-Q plot constructie Ab0110

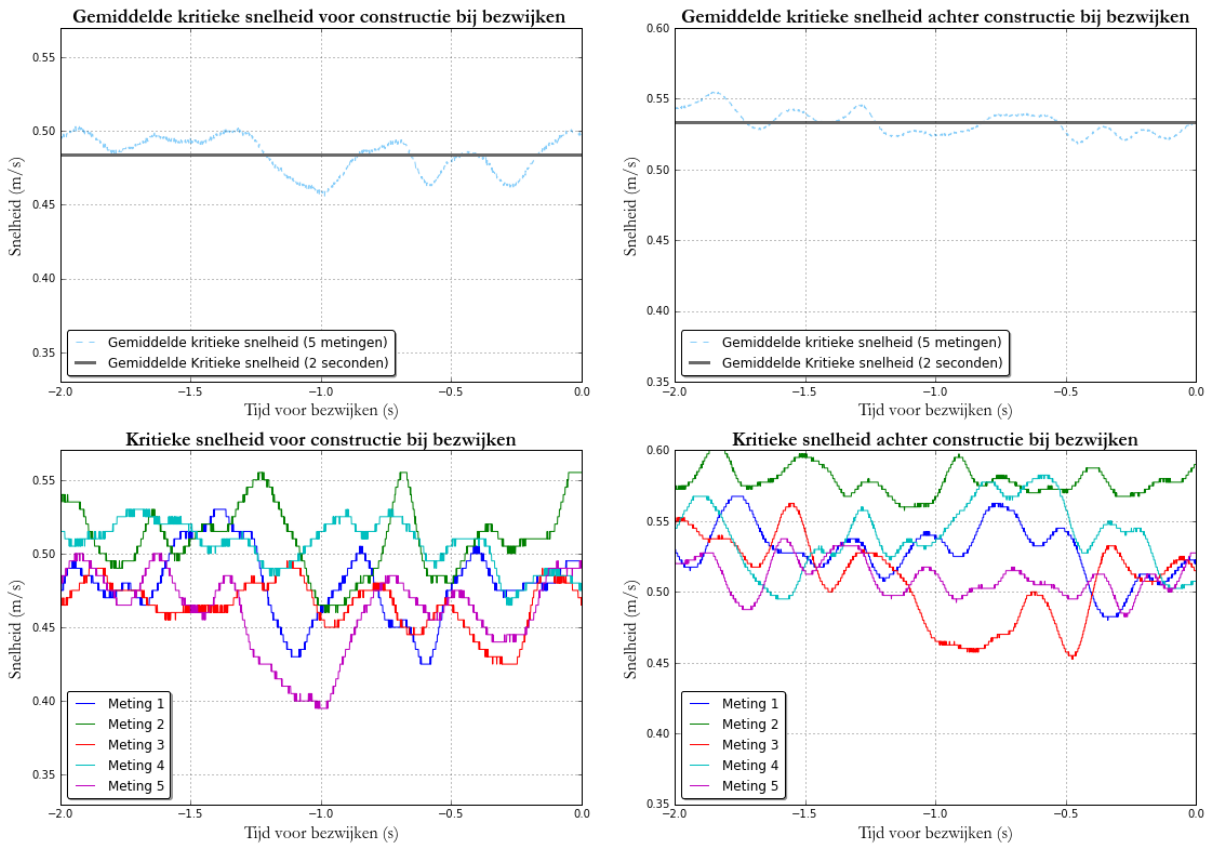
Bijlage 7: Resultaten snelheden



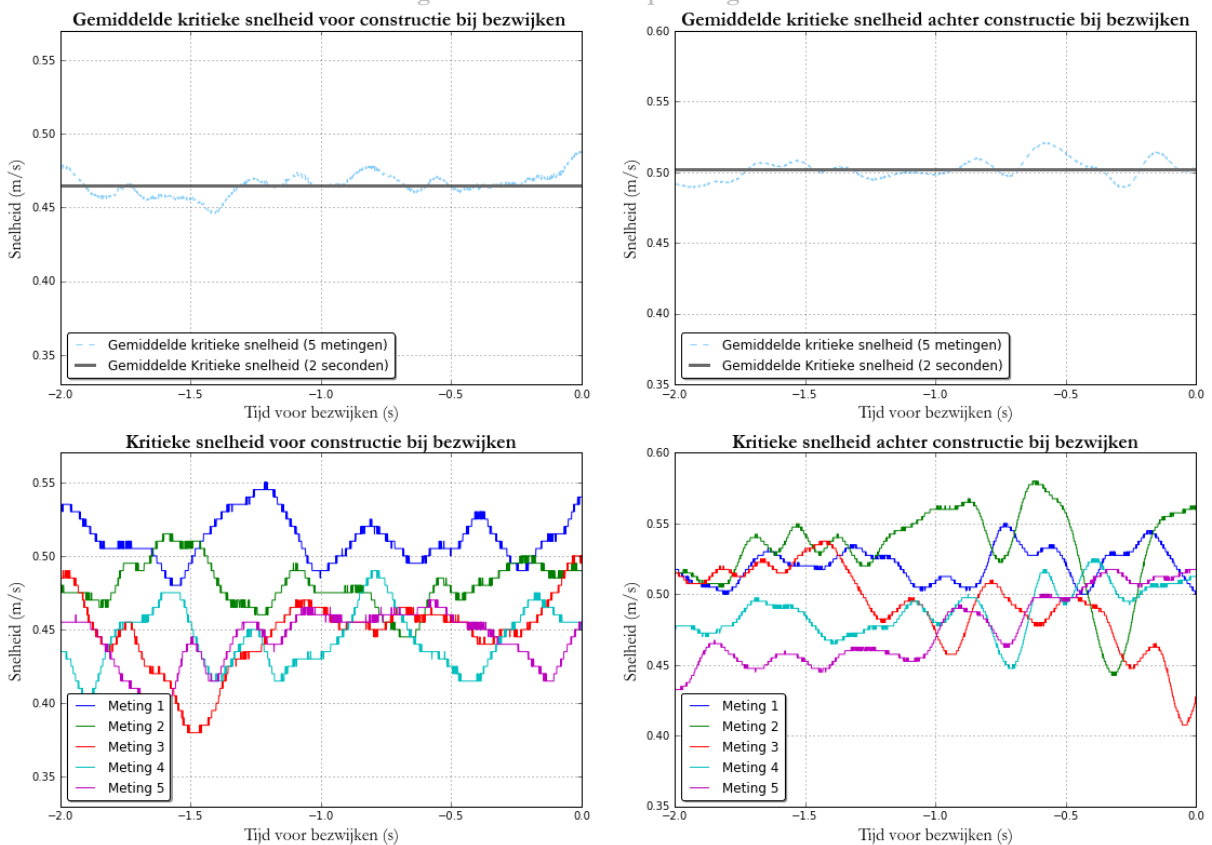
Figuur 9.7: Snelheden opstelling Aa0010



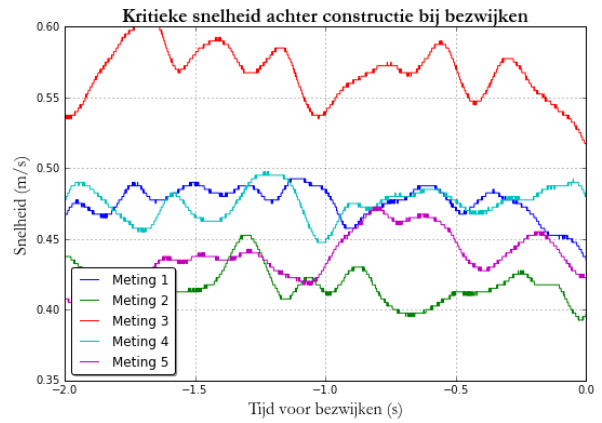
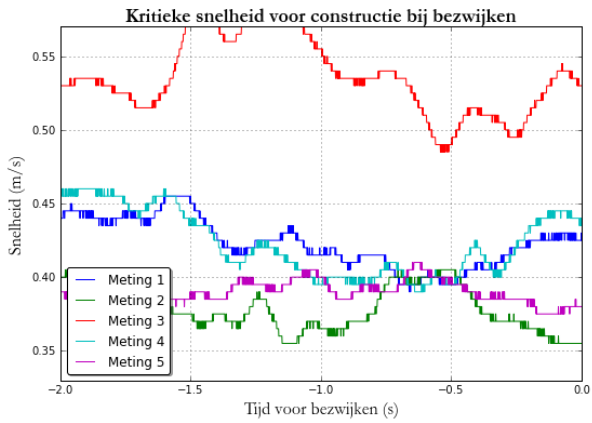
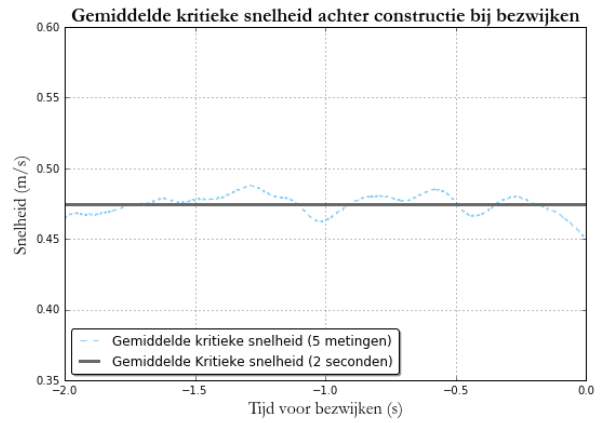
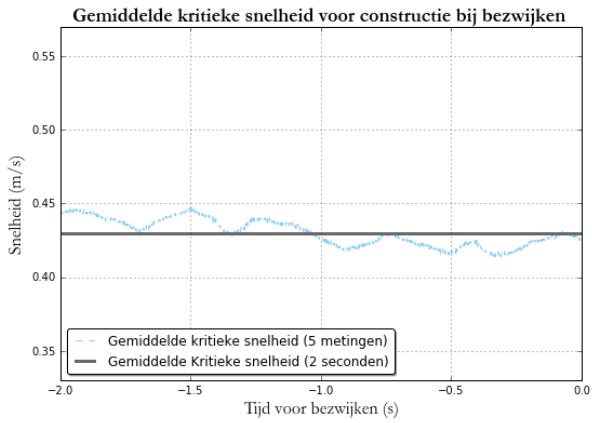
Figuur 9.8: Snelheden opstelling Aa0110



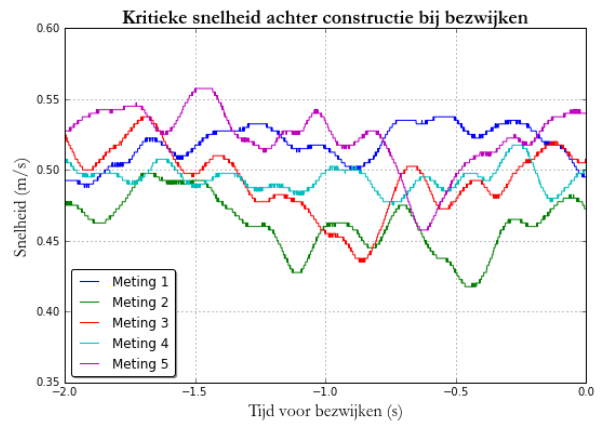
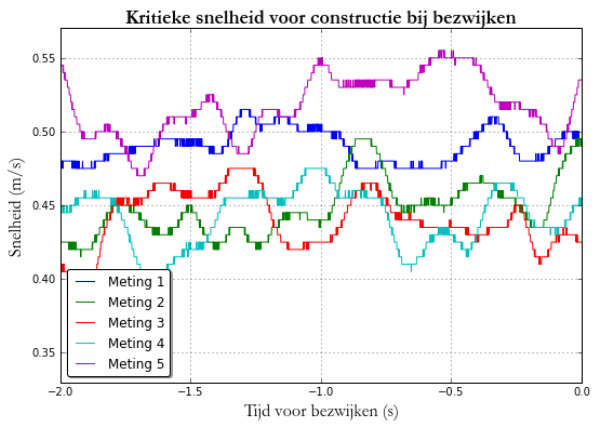
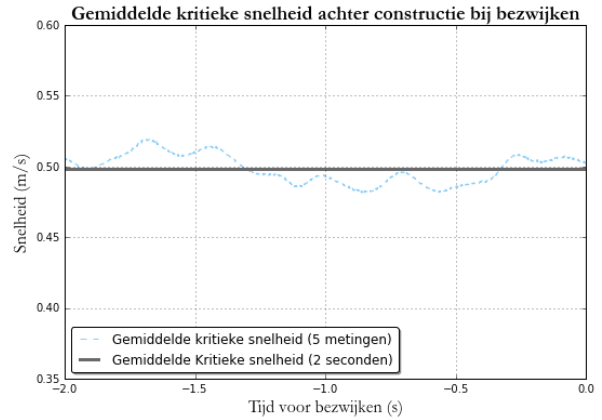
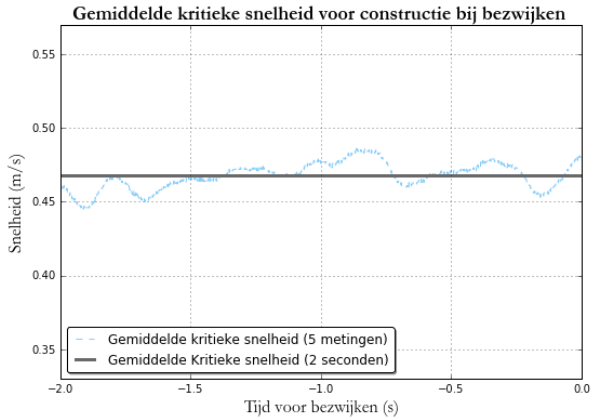
Figuur 9.9: Snelheden opstelling Aa1010



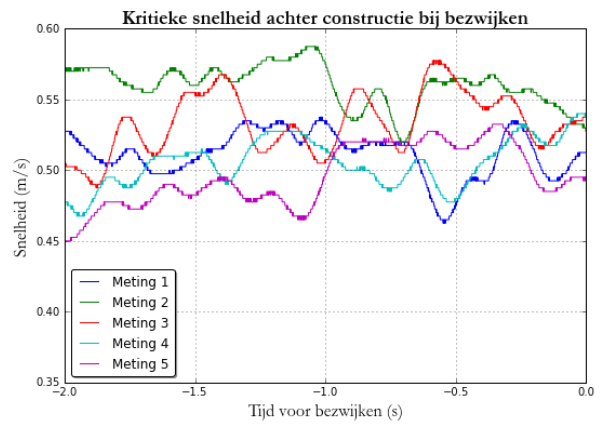
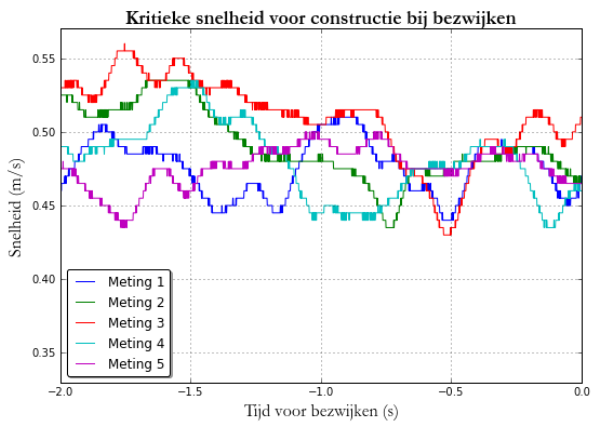
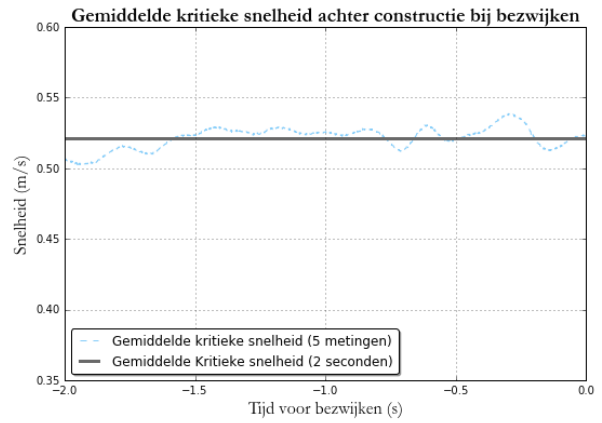
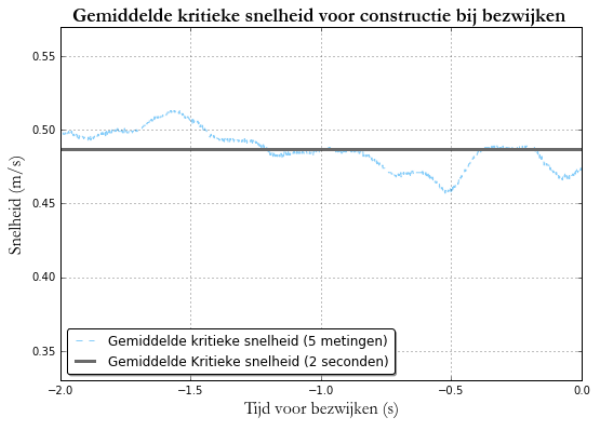
Figuur 9.10: Snelheden opstelling Aa1110



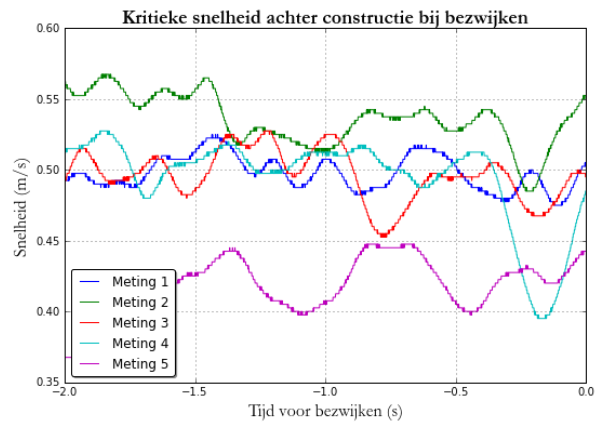
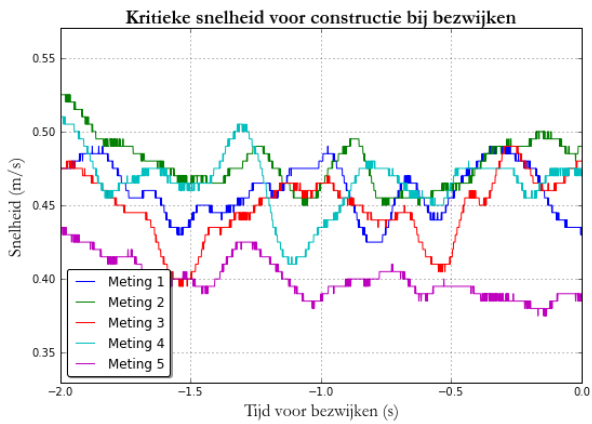
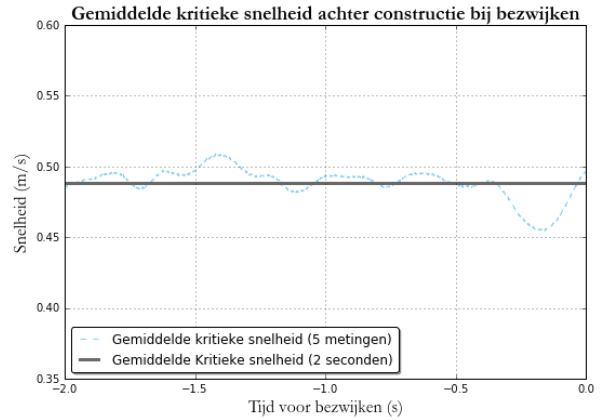
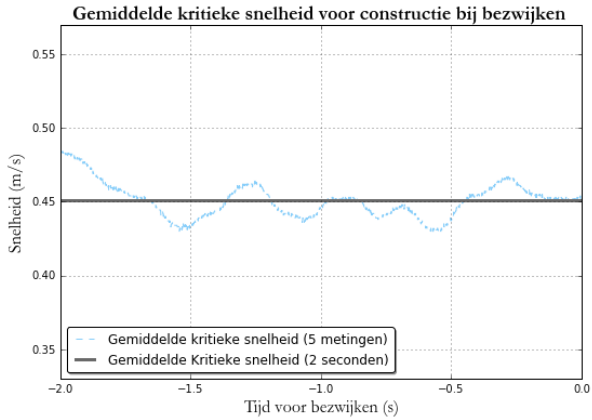
Figuur 9.11: Snelheden opstelling Ab0010



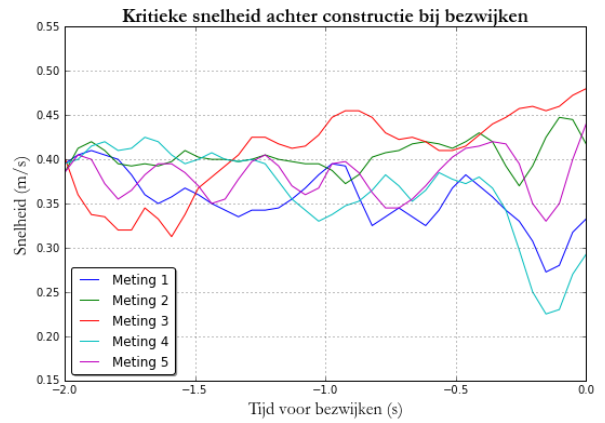
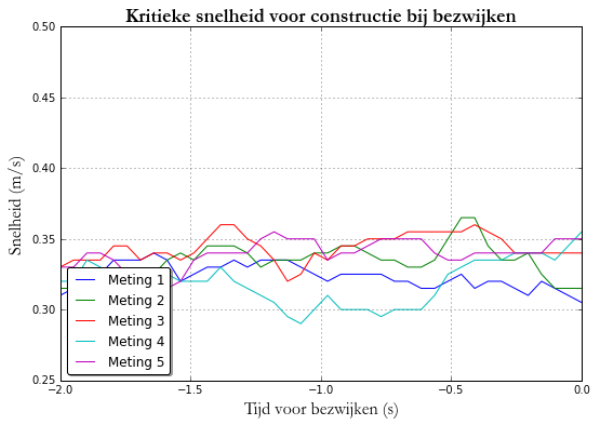
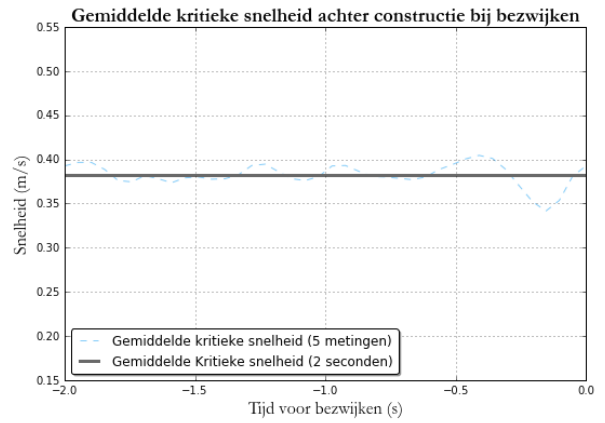
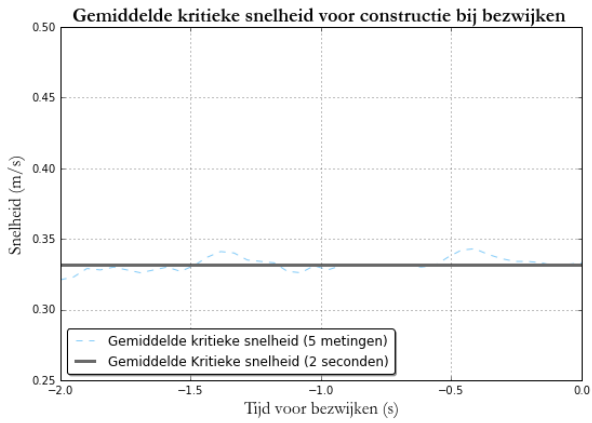
Figuur 9.12: Snelheden opstelling Ab0110



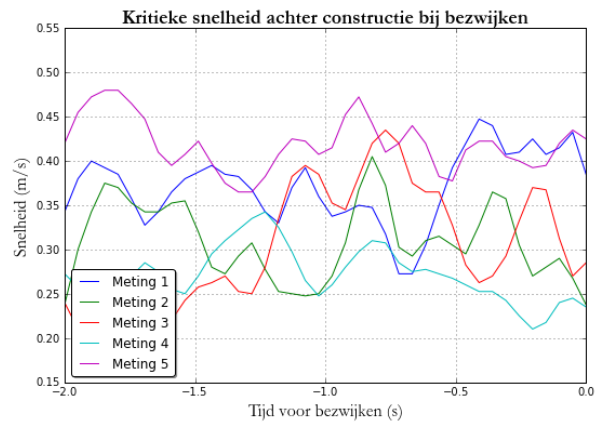
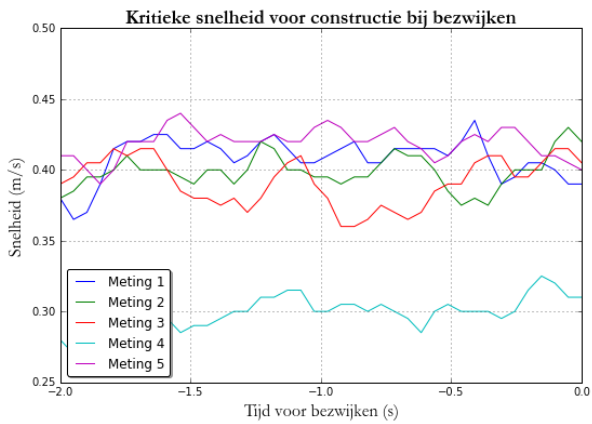
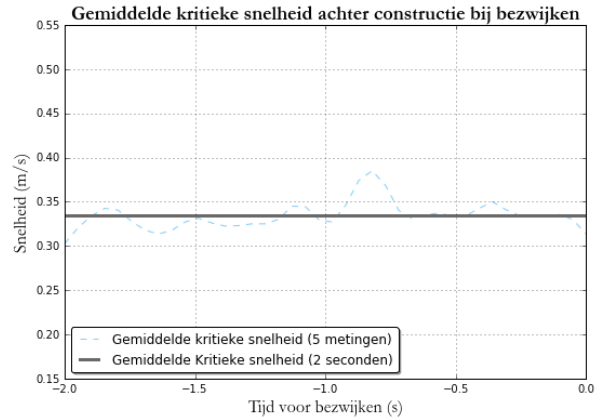
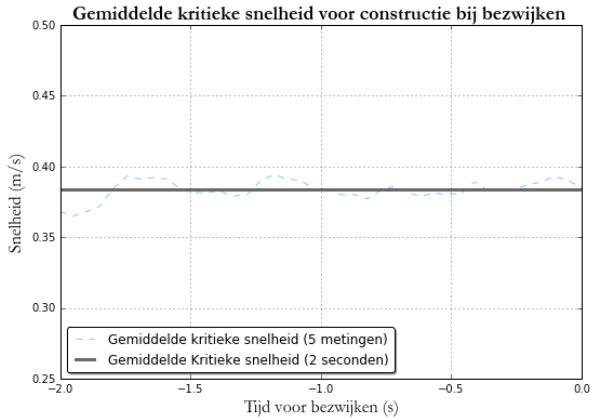
Figuur 9.13: Snelheden opstelling Ab1010



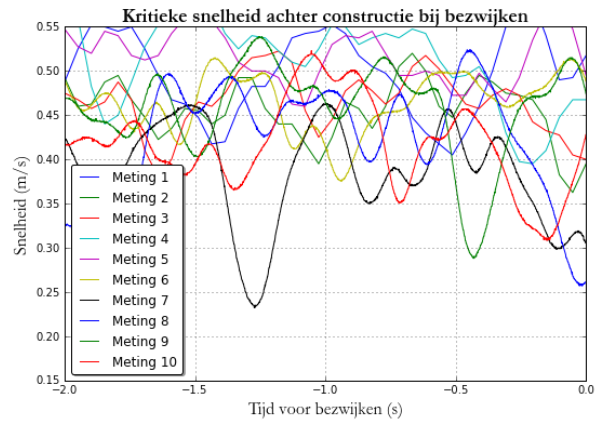
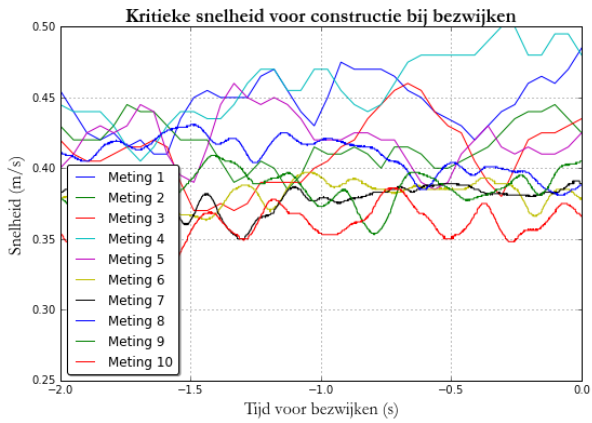
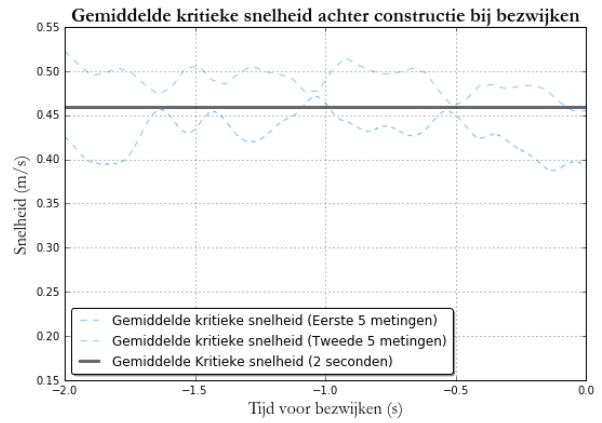
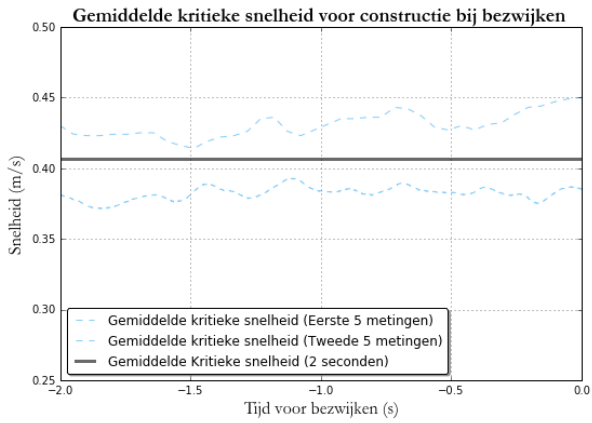
Figuur 9.14: Snelheden opstelling Ab1110



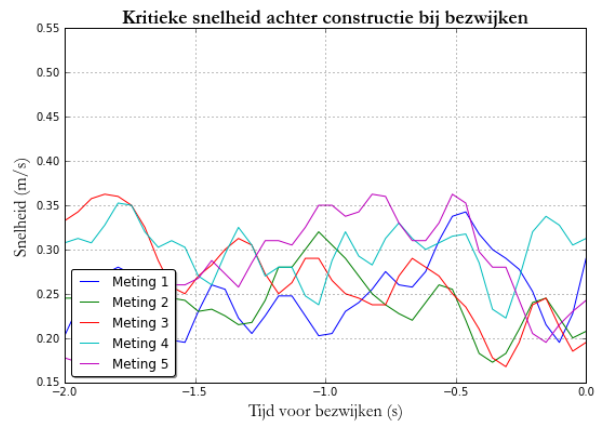
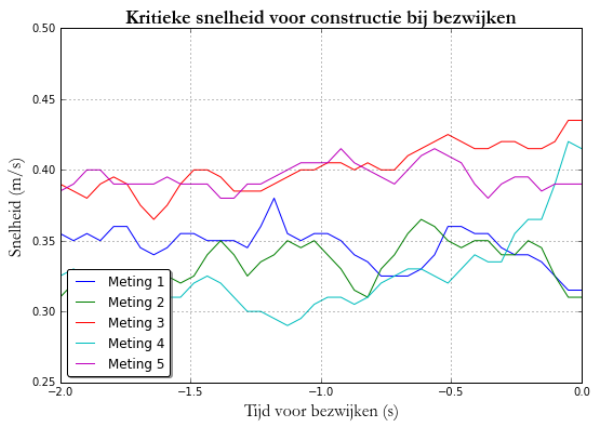
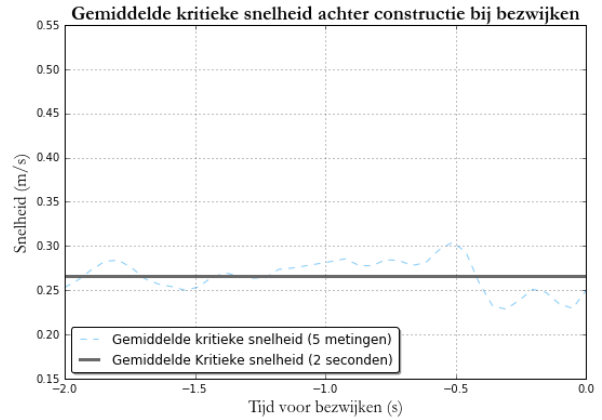
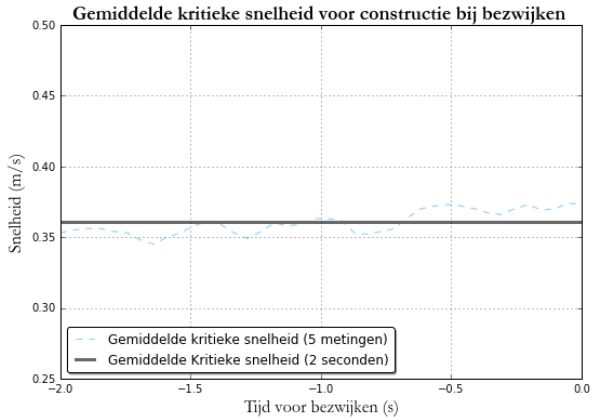
Figuur 9.15: Snelheden opstelling Ba0020



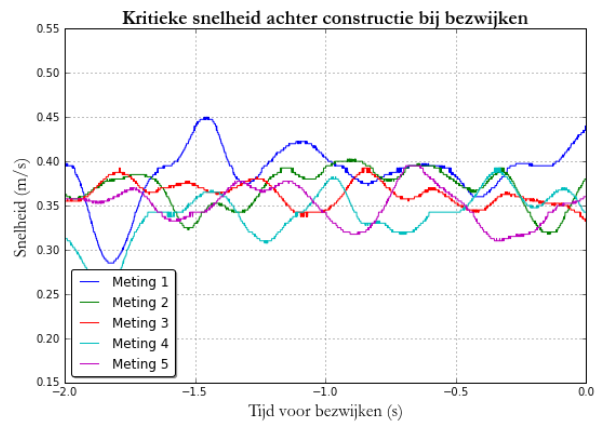
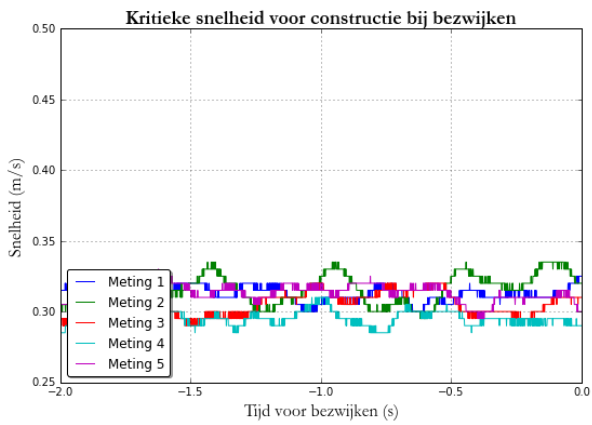
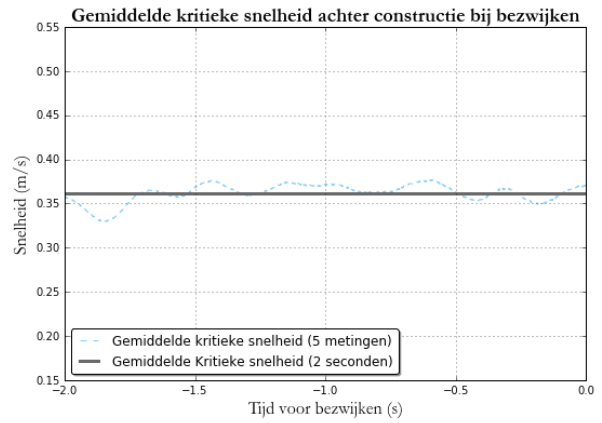
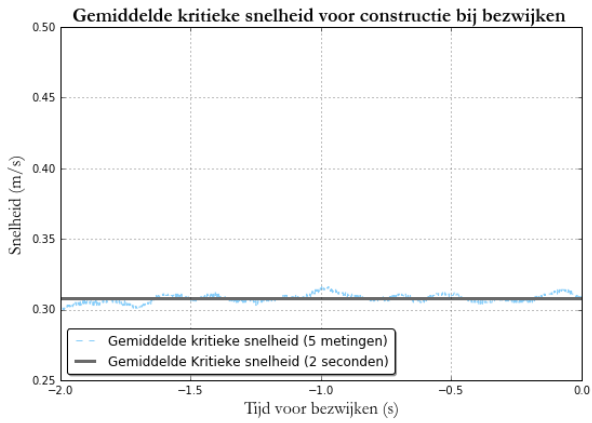
Figuur 9.16: Snelheden opstelling Ba0030



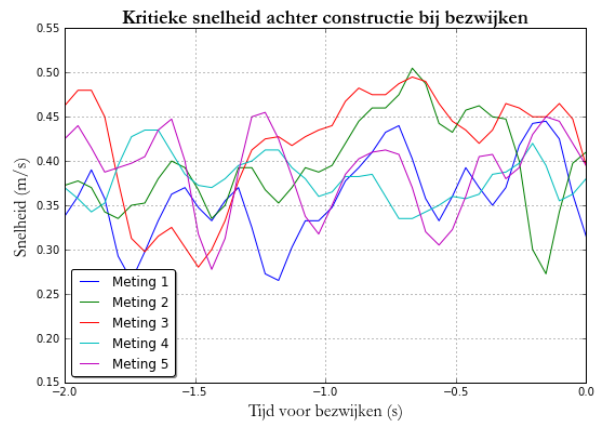
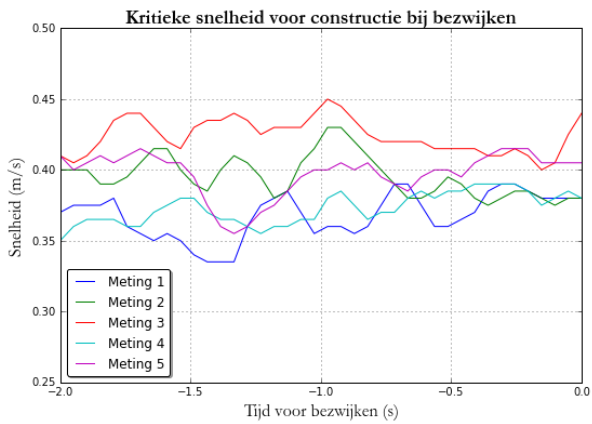
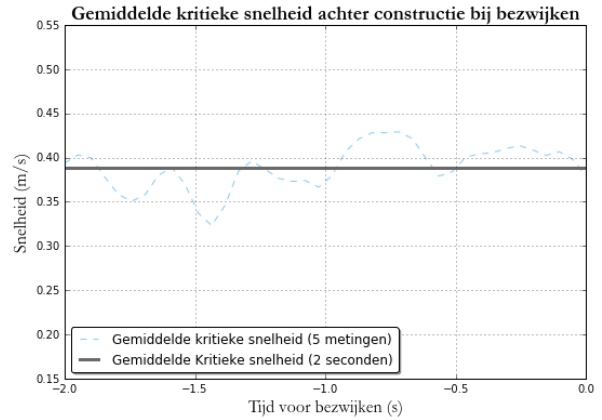
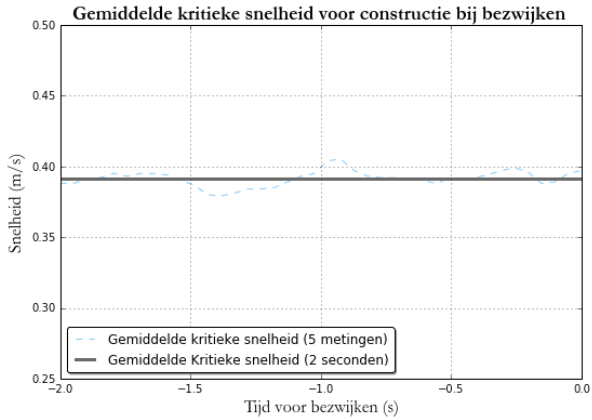
Figuur 9.17: Snelheden opstelling Ba1020



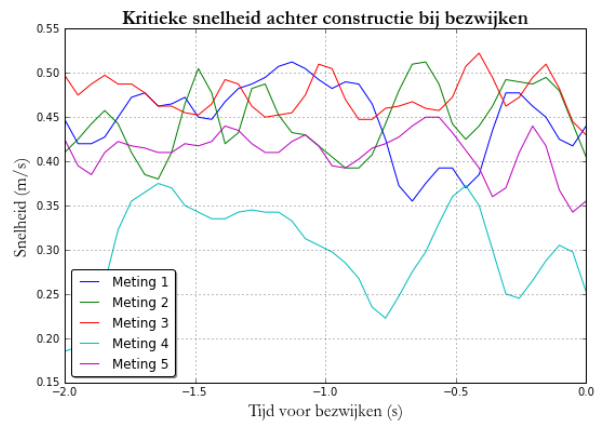
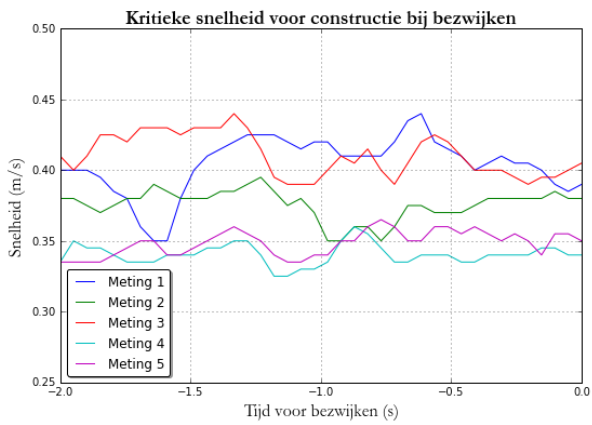
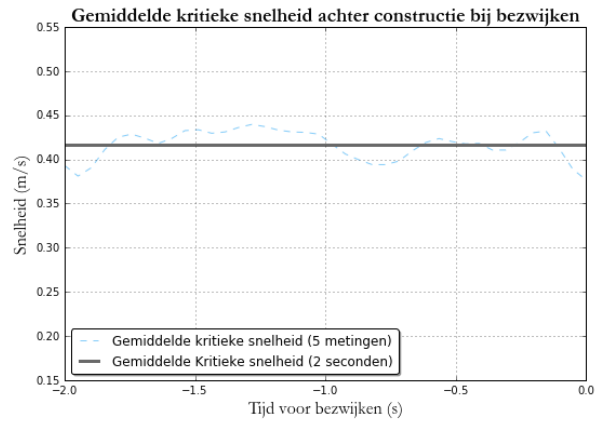
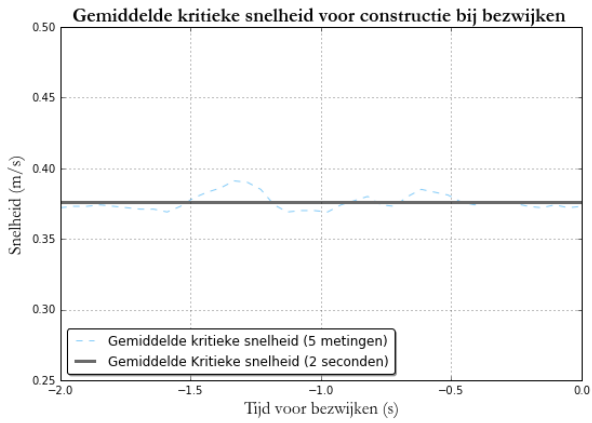
Figuur 9.18: Snelheden opstelling Ba1030



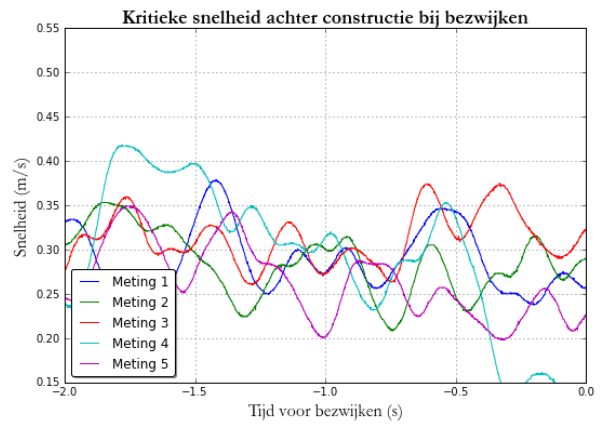
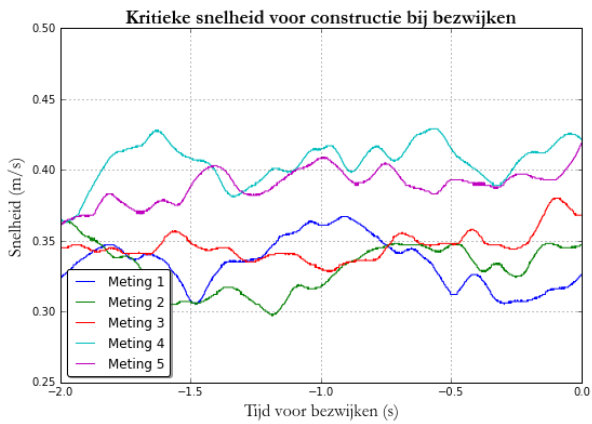
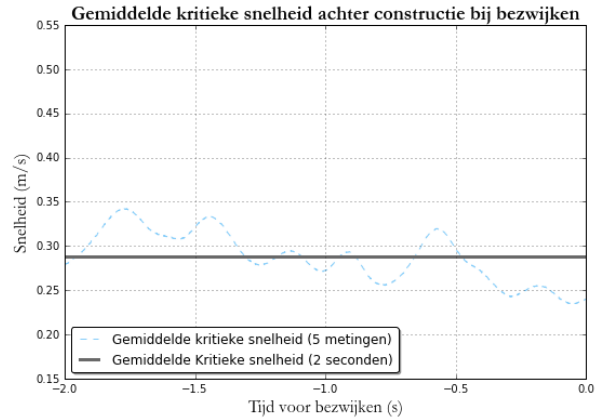
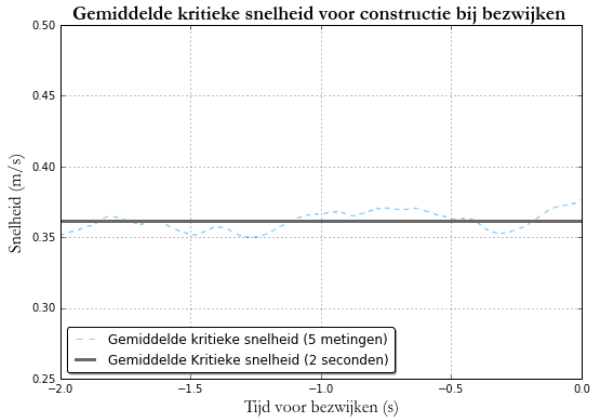
Figuur 9.19: Snelheden opstelling Bb0020



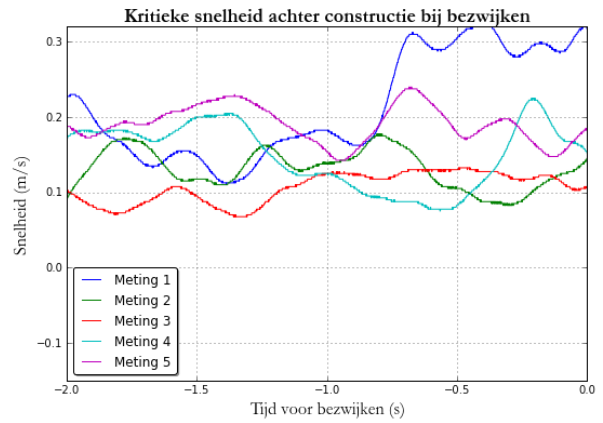
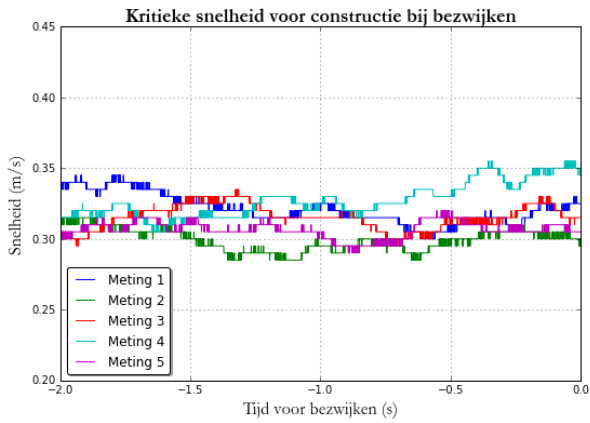
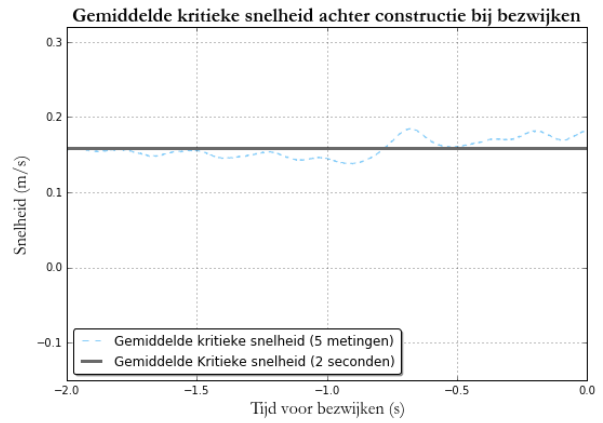
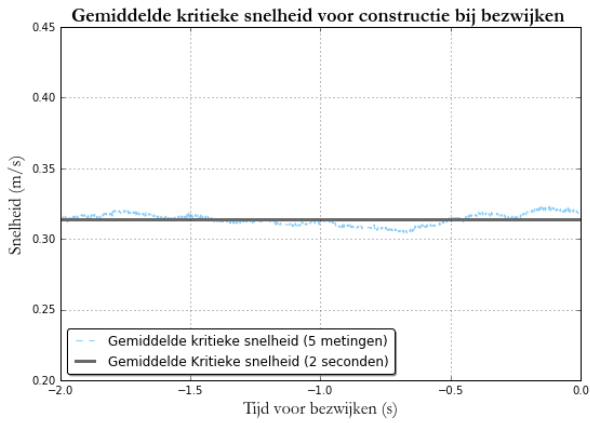
Figuur 9.20: Snelheden opstelling Bb0030



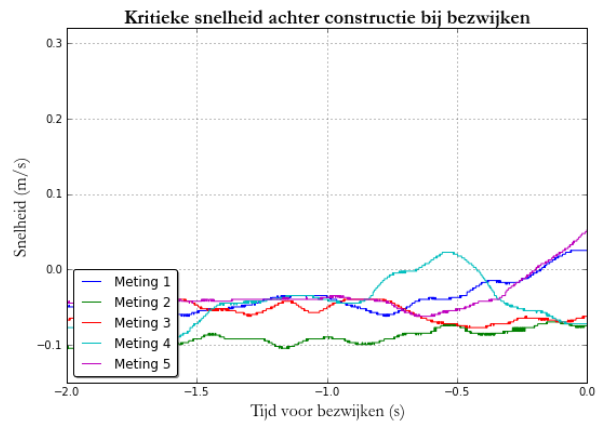
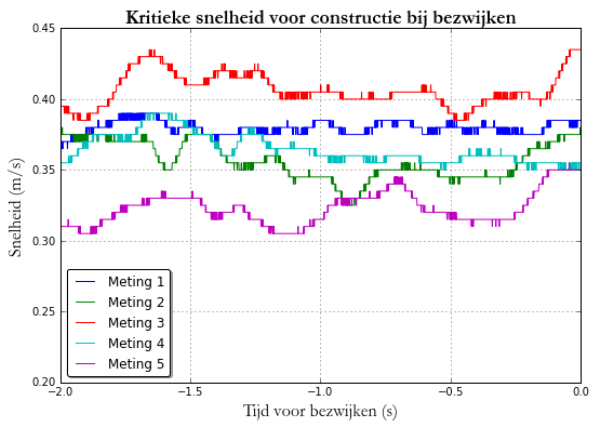
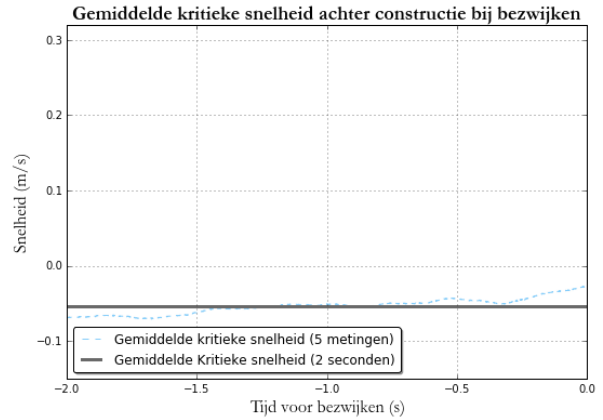
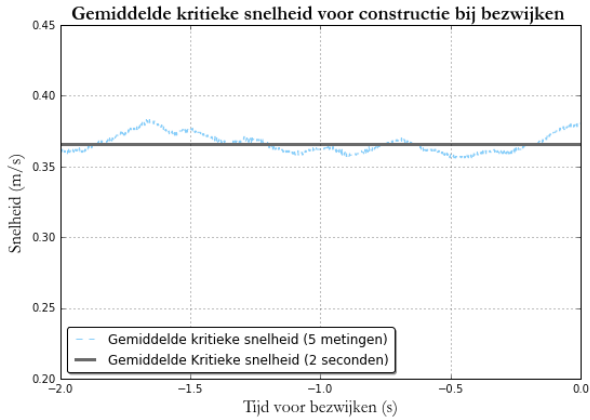
Figuur 9.21: Snelheden opstelling Bb1020



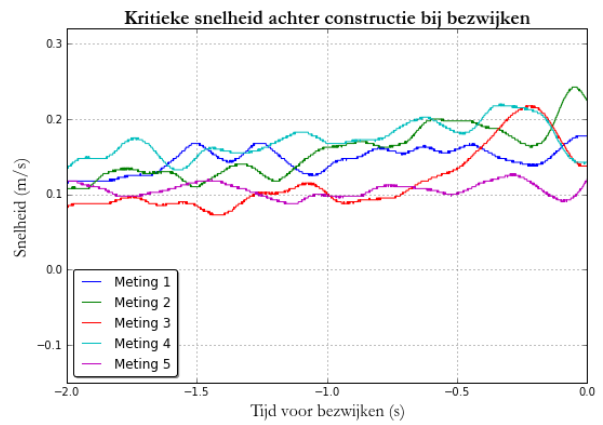
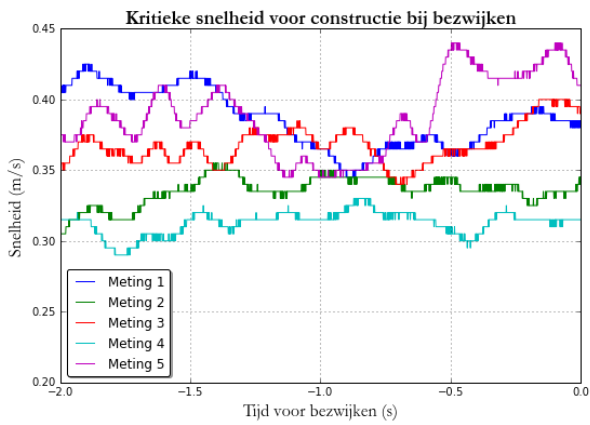
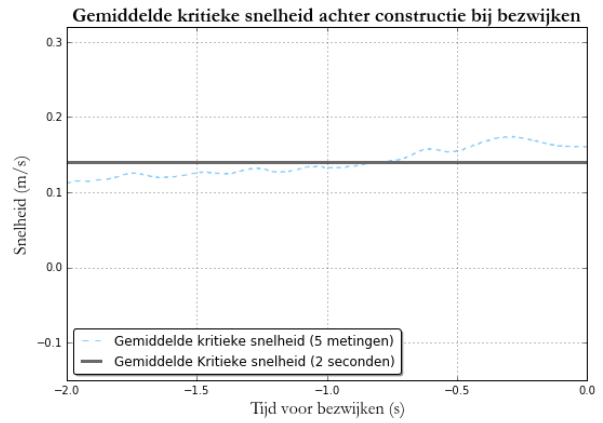
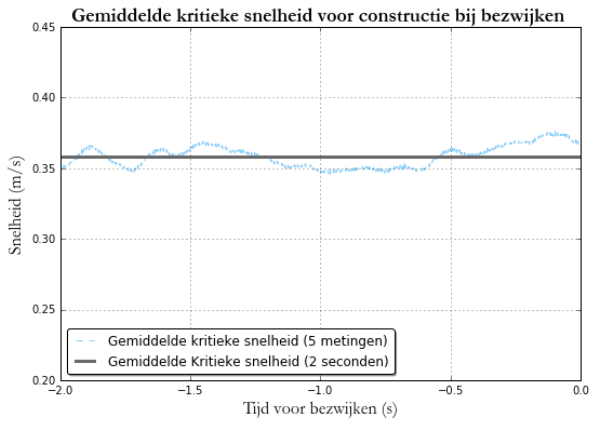
Figuur 9.22: Snelheden opstelling Bb1030



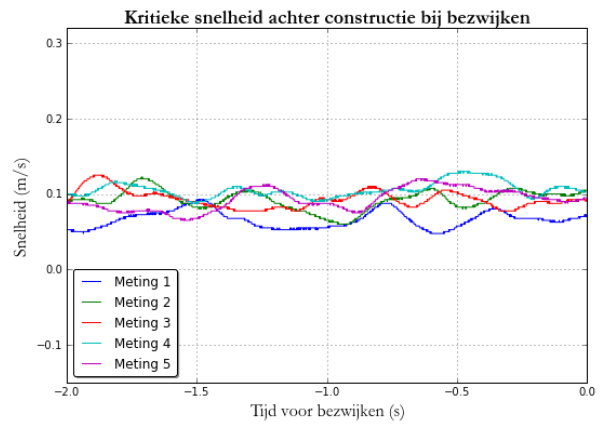
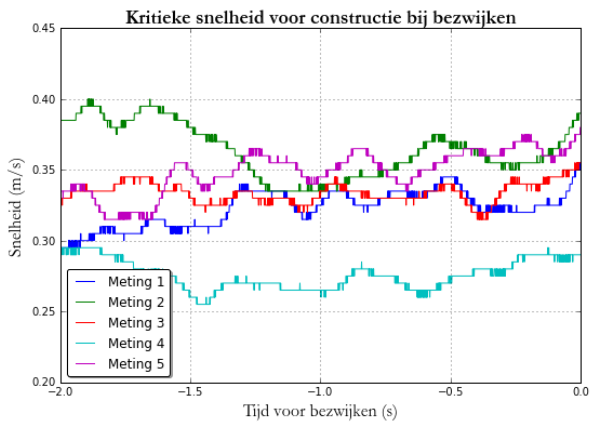
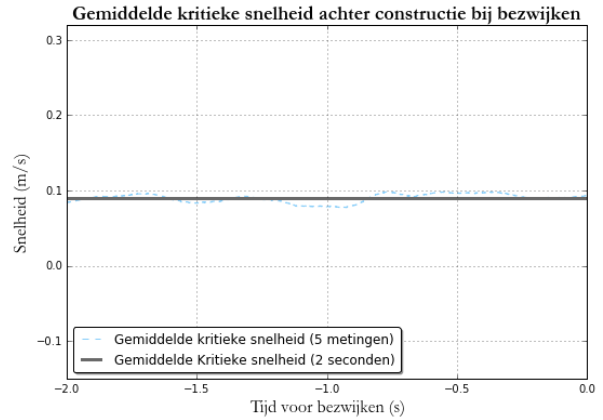
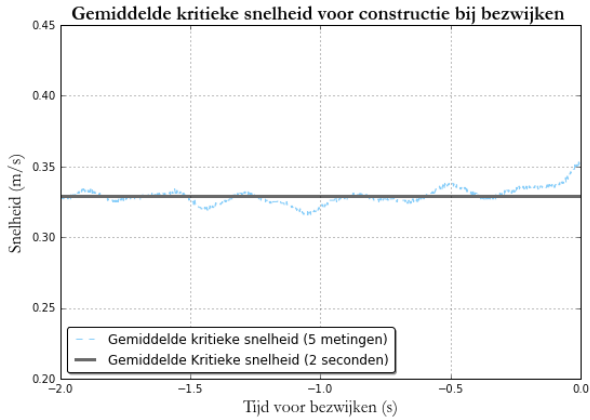
Figuur 9.23: Snelheden opstelling Ca1040



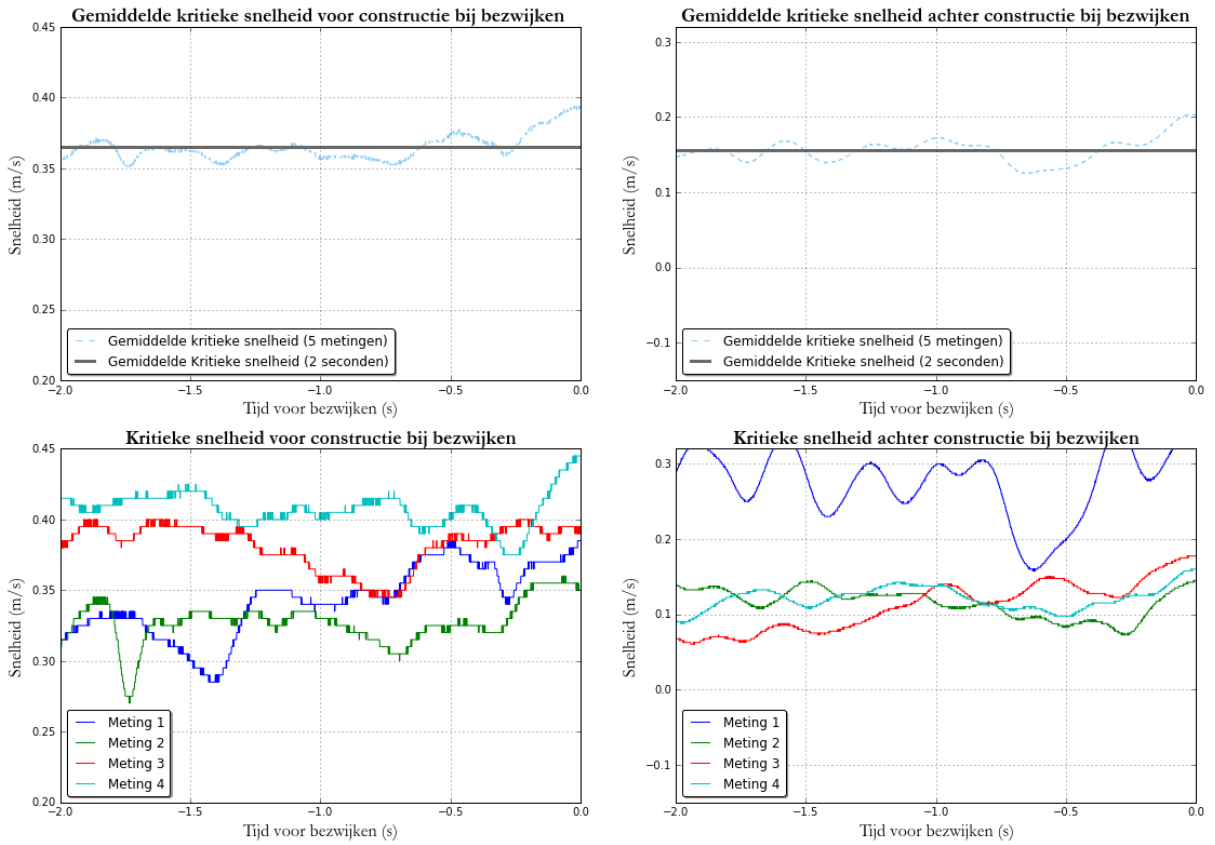
Figuur 9.24: Snelheden opstelling Ca1042



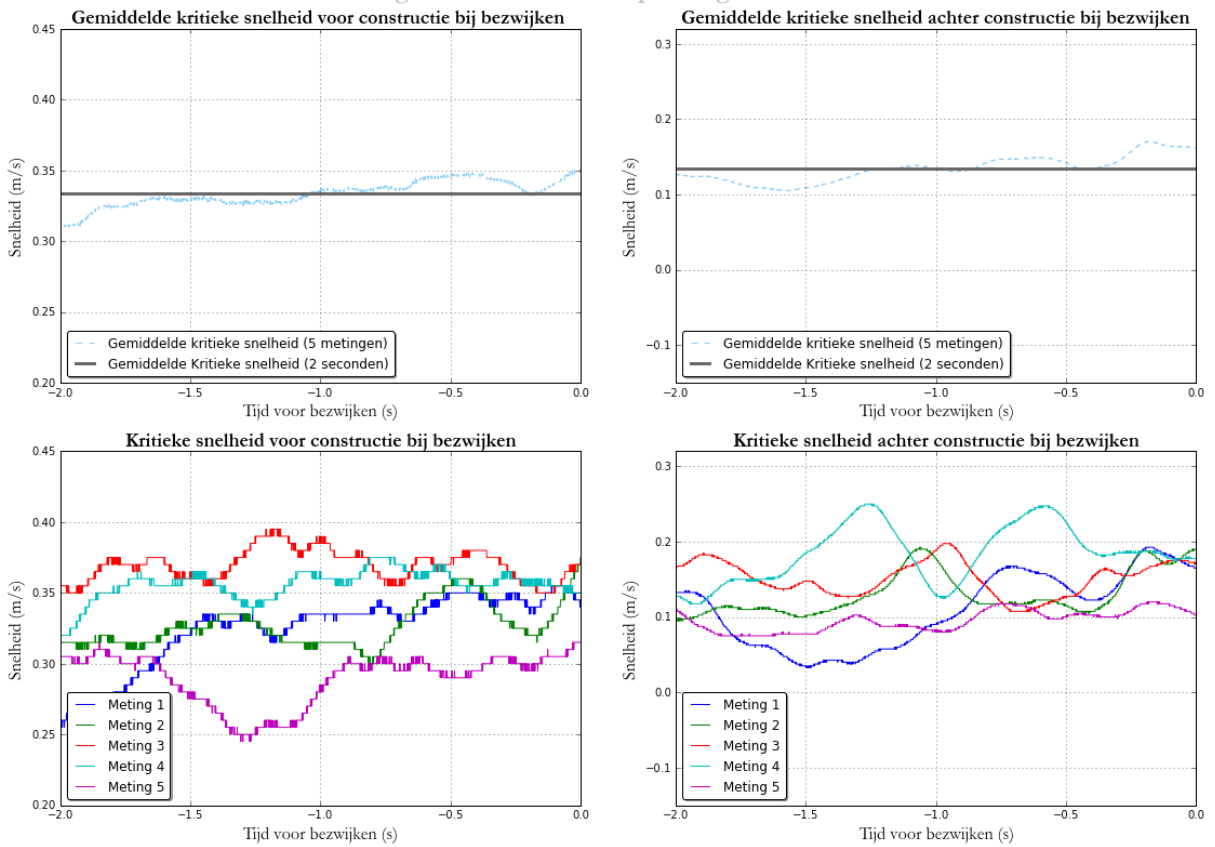
Figuur 9.25: Snelheden opstelling Ca1040*



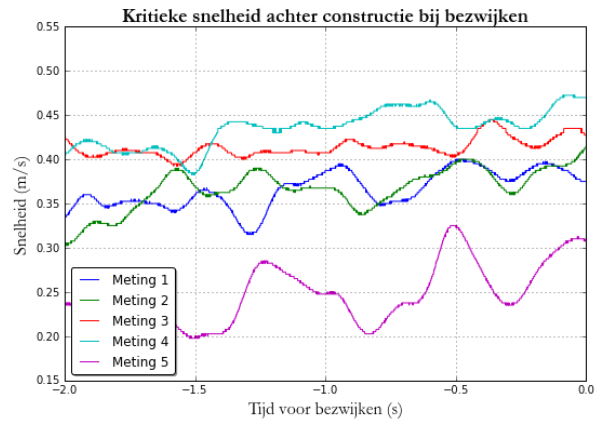
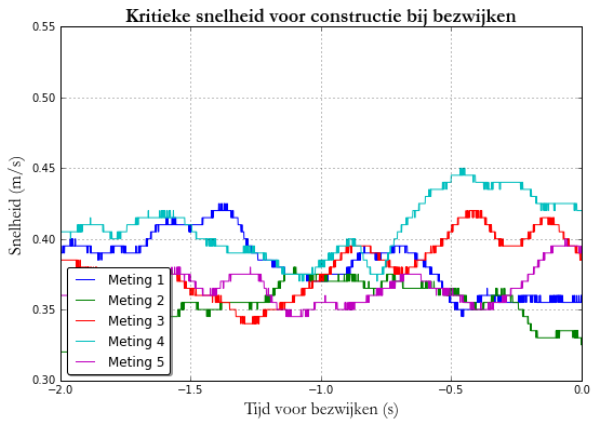
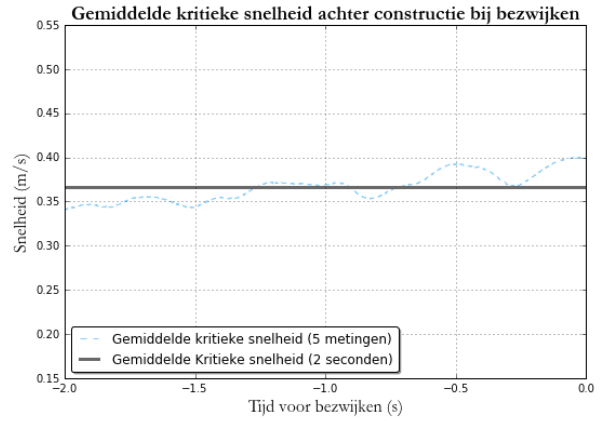
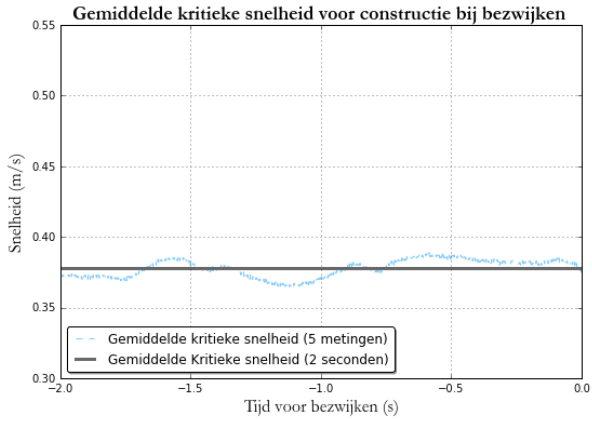
Figuur 9.26: Snelheden opstelling Ca1042*



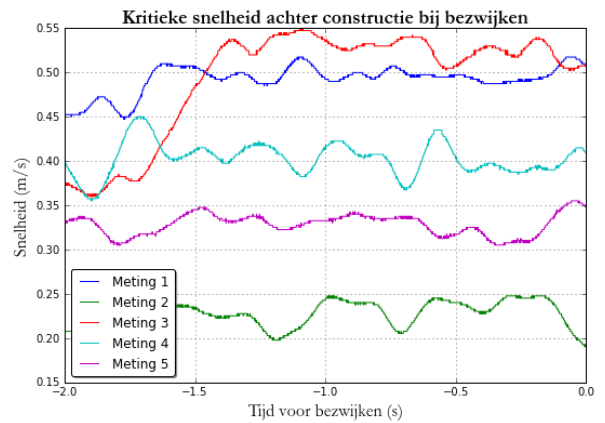
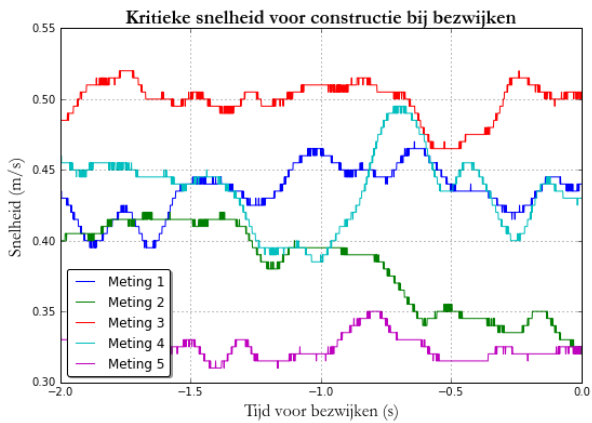
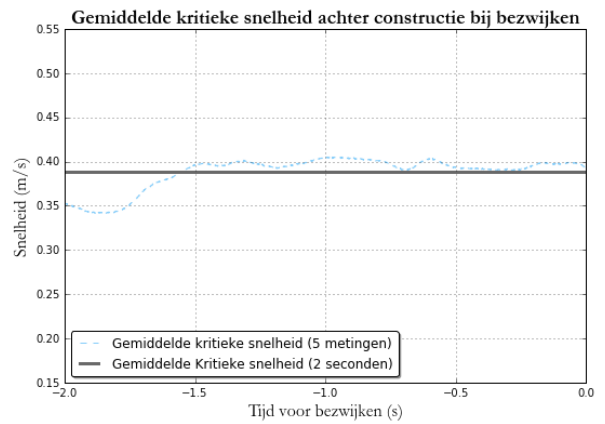
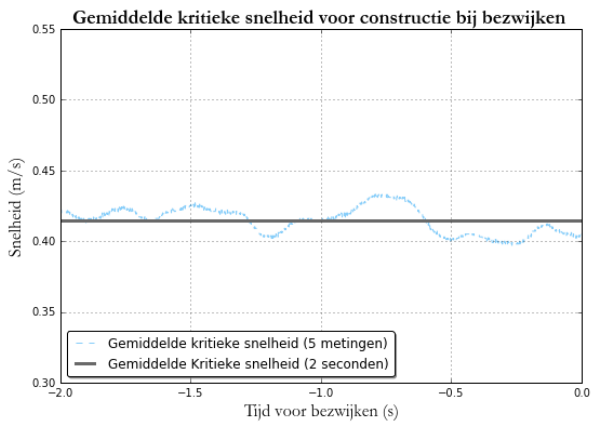
Figuur 9.27: Snelheden opstelling Ca1040*V



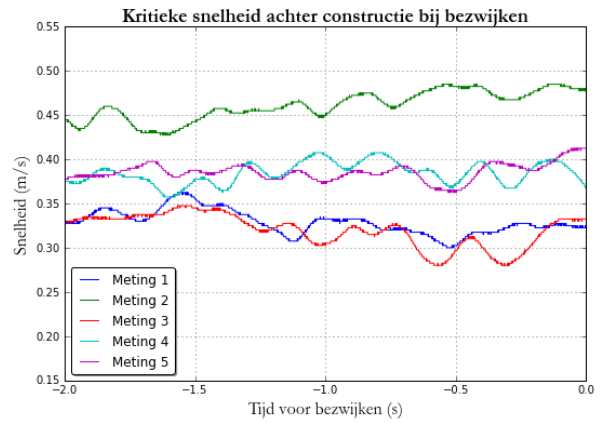
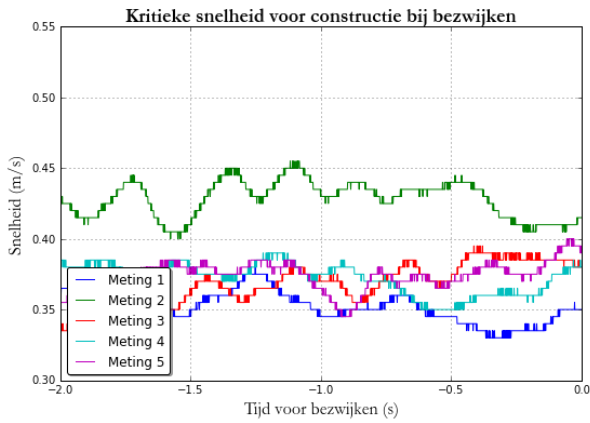
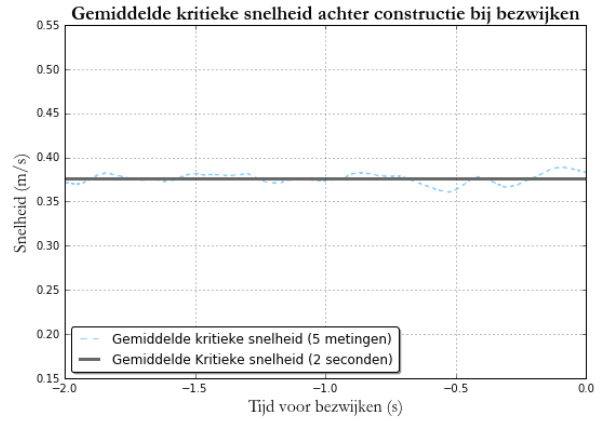
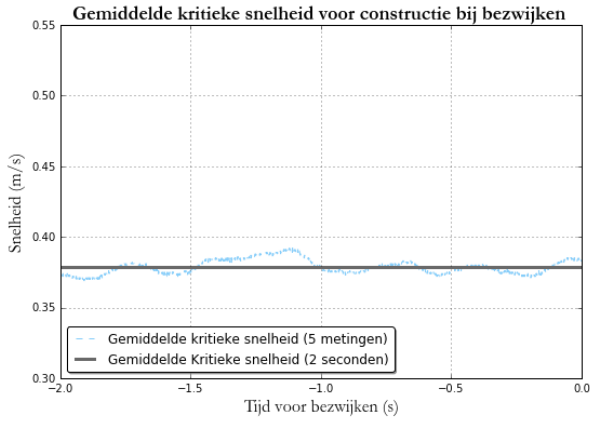
Figuur 9.28: Snelheden opstelling Ca1040V



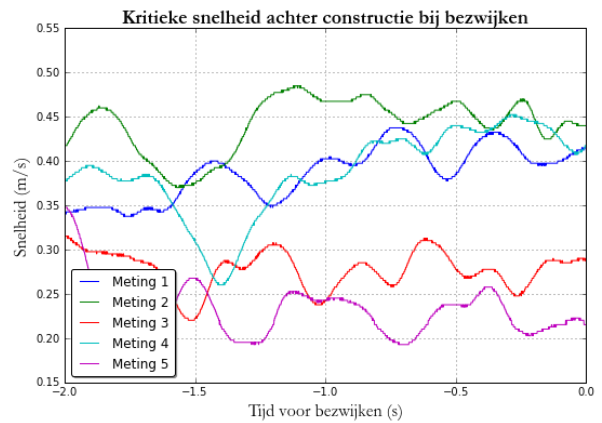
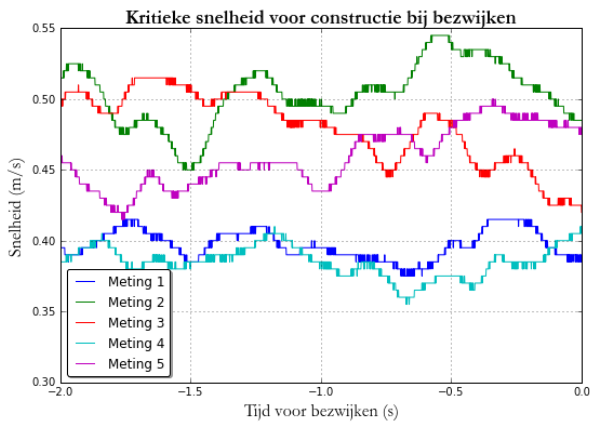
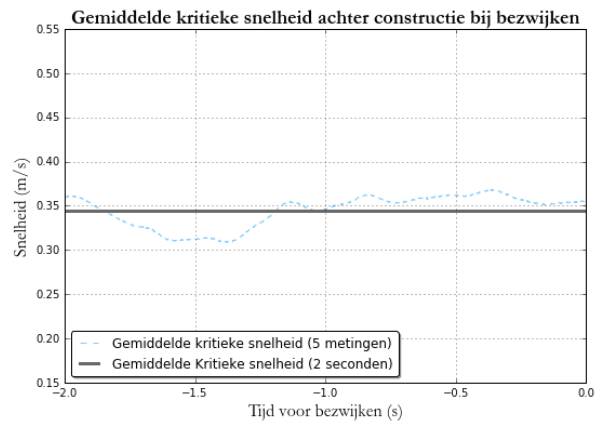
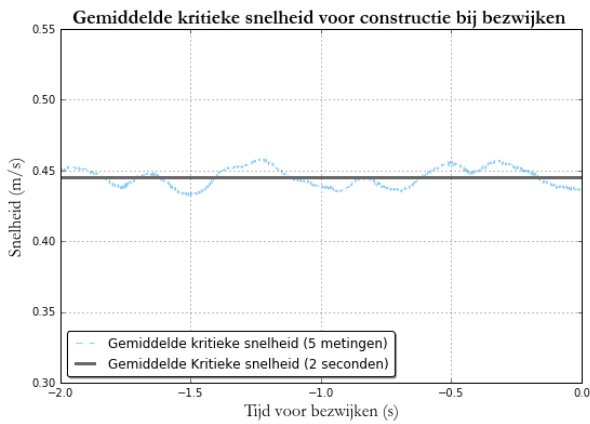
Figuur 9.29: Snelheden opstelling Da0020



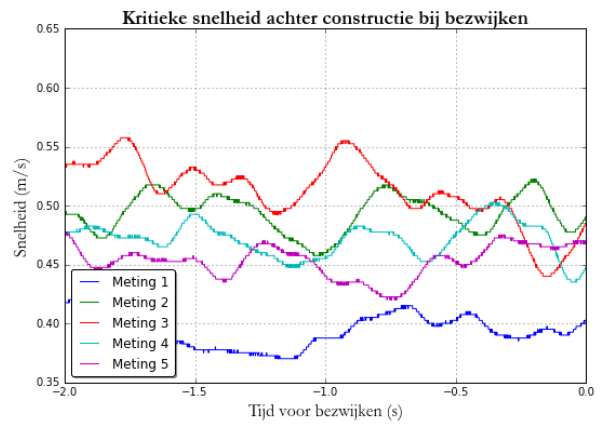
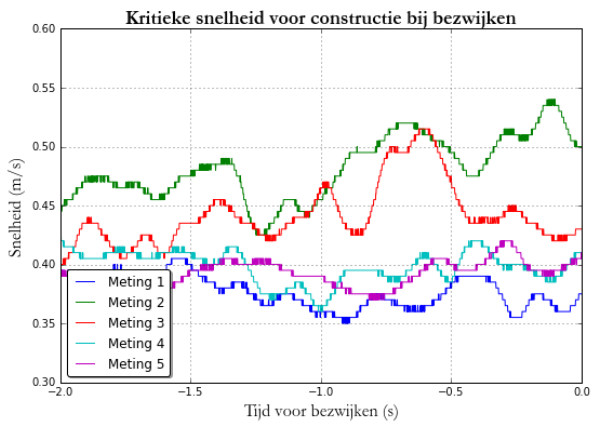
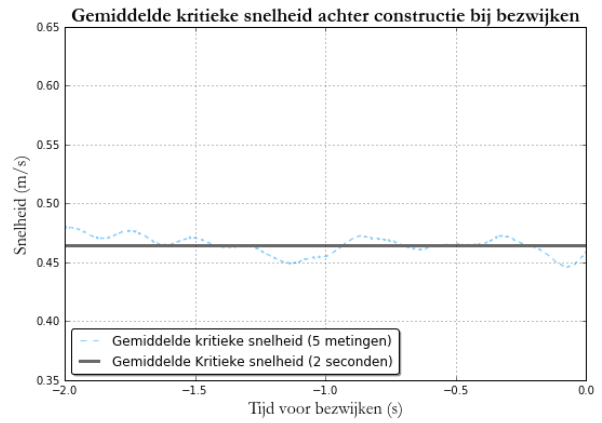
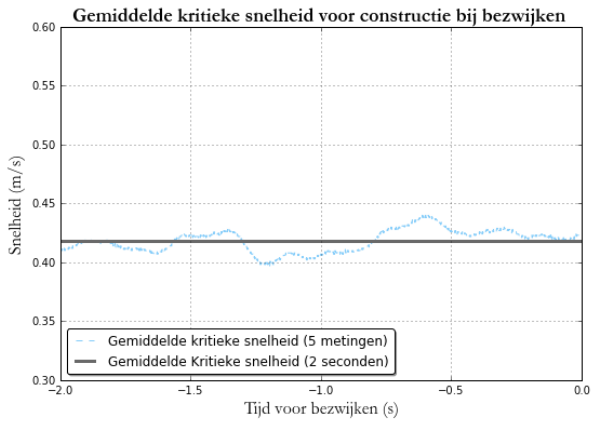
Figuur 9.30: Snelheden opstelling Da1020



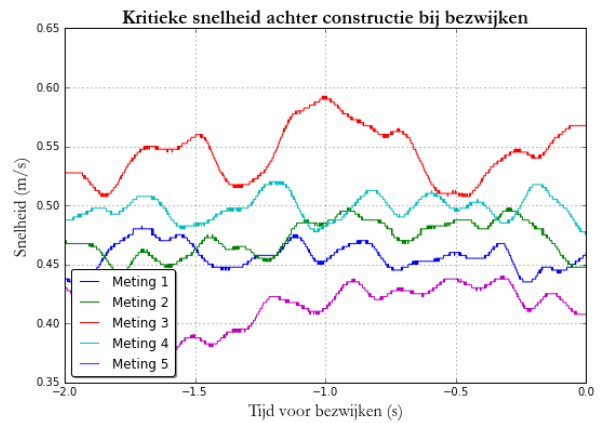
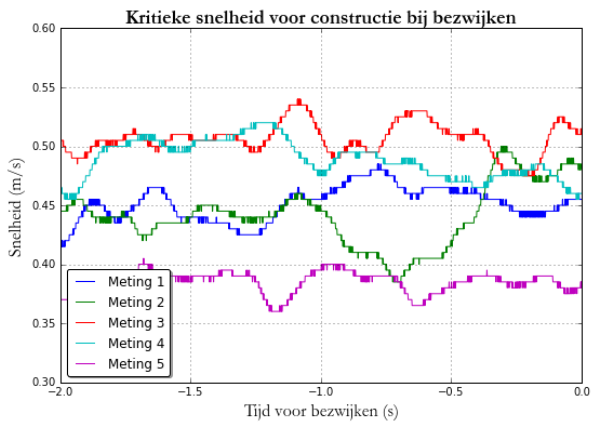
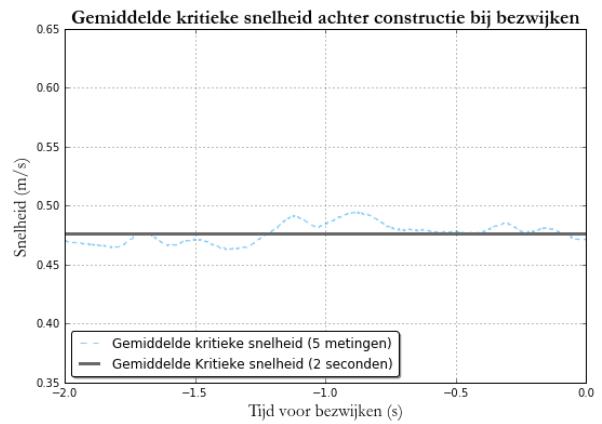
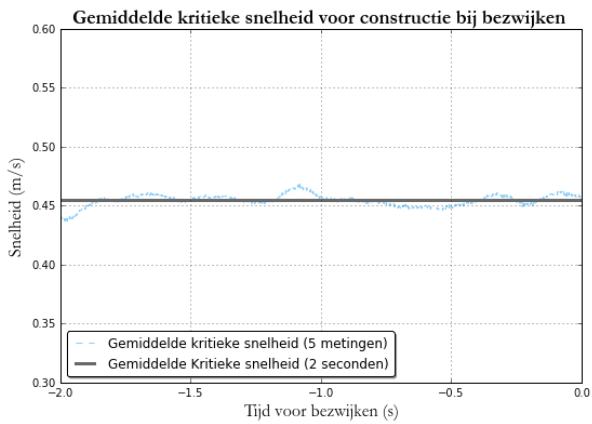
Figuur 9.31: Snelheden opstelling Db0020



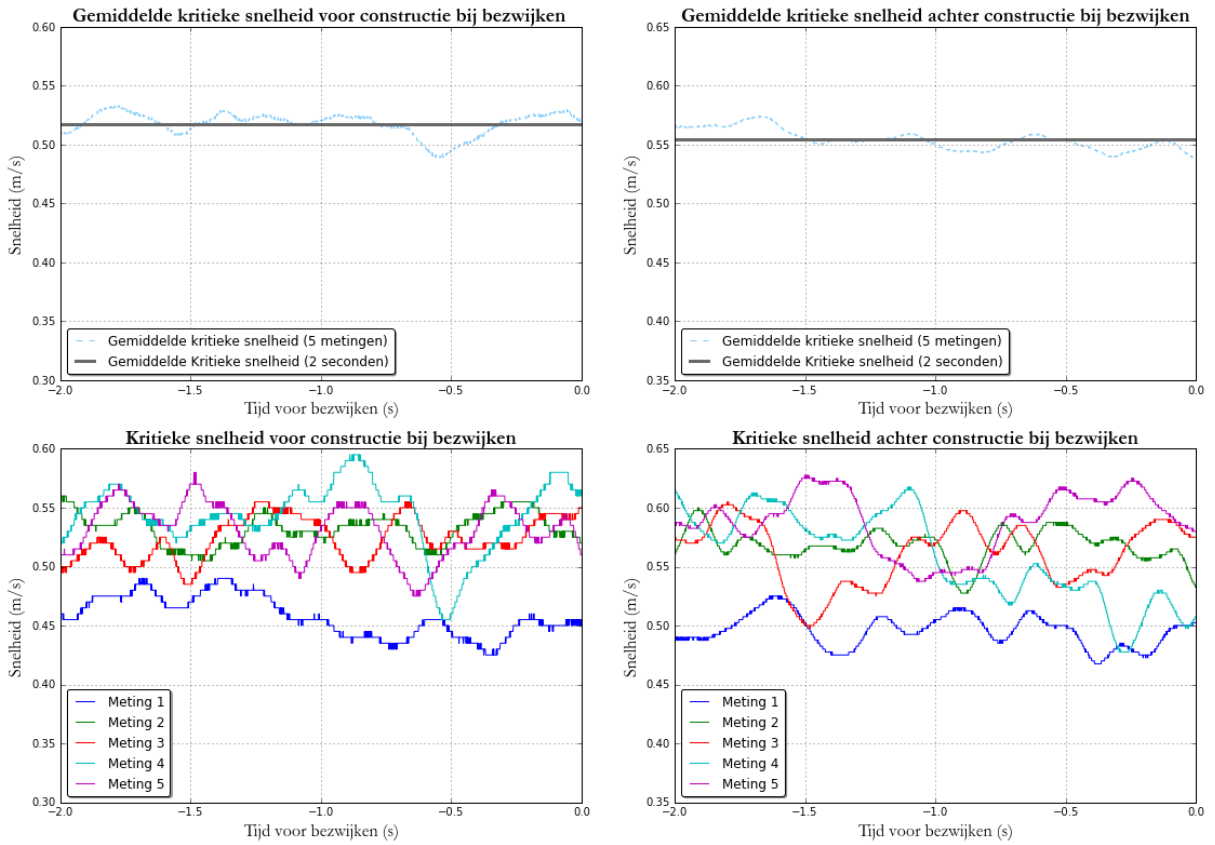
Figuur 9.32: Snelheden opstelling Db1020



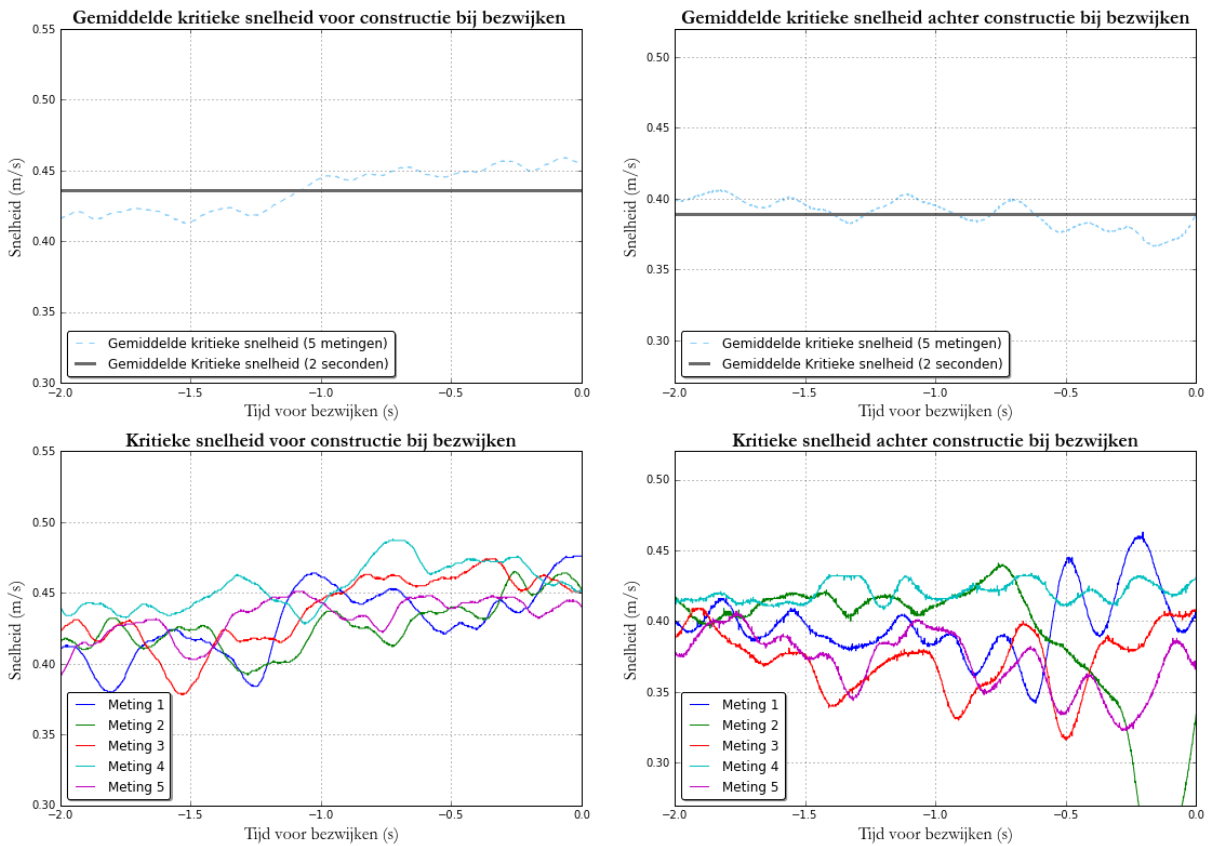
Figuur 9.33: Snelheden opstelling Ec0010



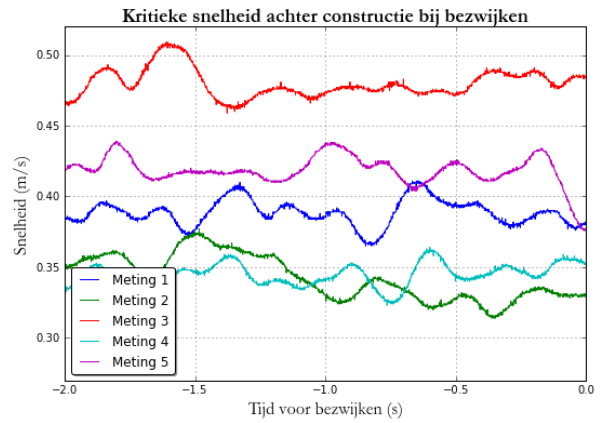
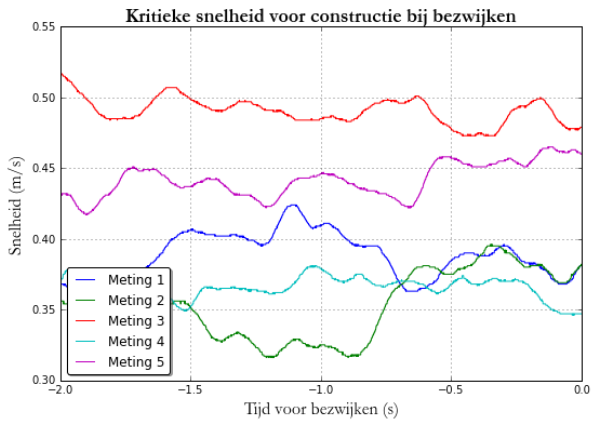
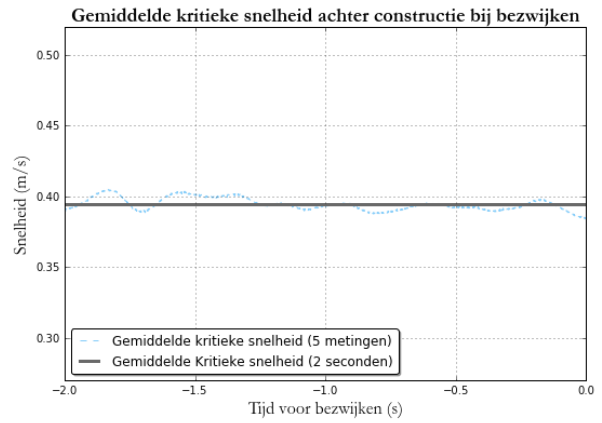
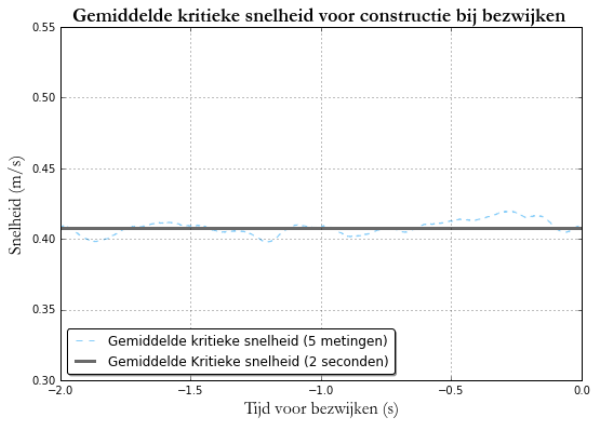
Figuur 9.34: Snelheden opstelling Ec0110



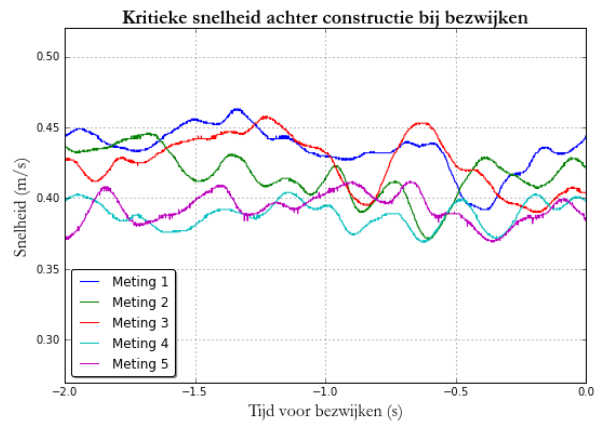
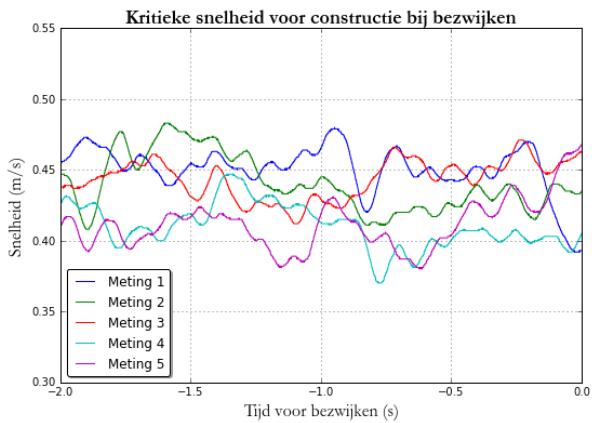
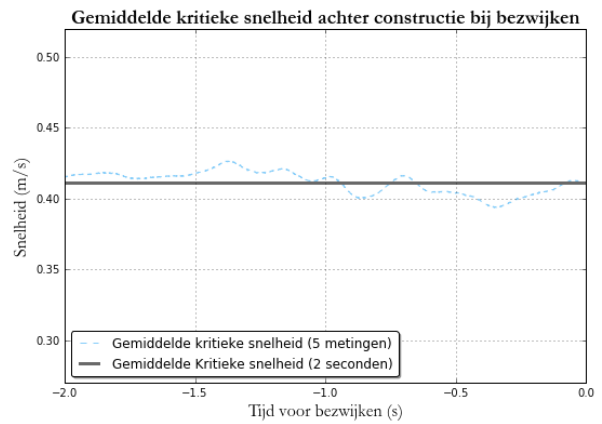
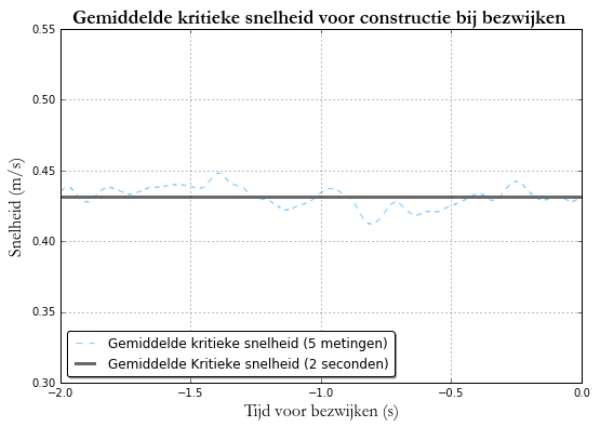
Figuur 9.35: Snelheden opstelling Ec0210



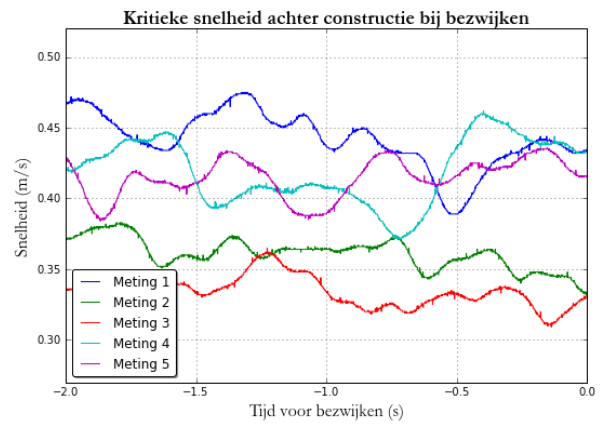
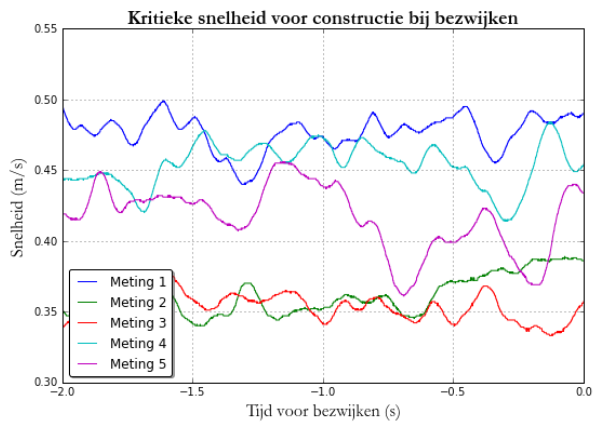
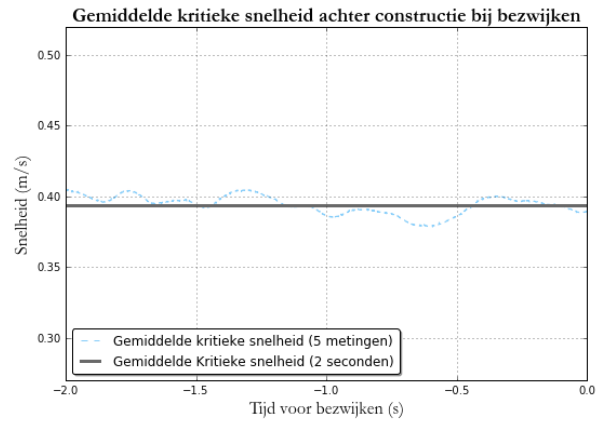
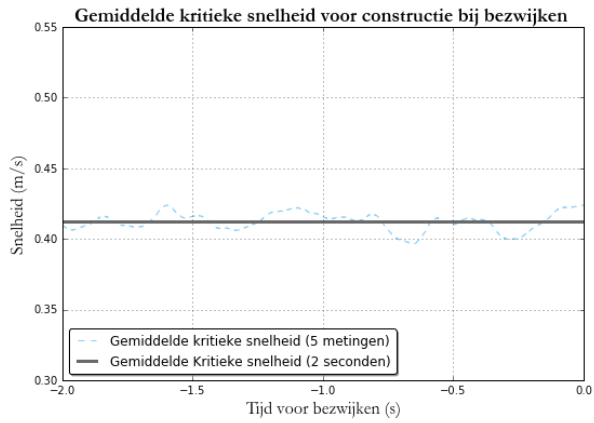
Figuur 9.36: Snelheden opstelling Fa0010KB



Figuur 9.37: Snelheden opstelling Fa0010KS

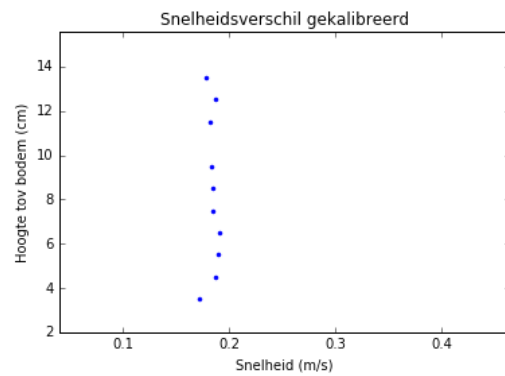
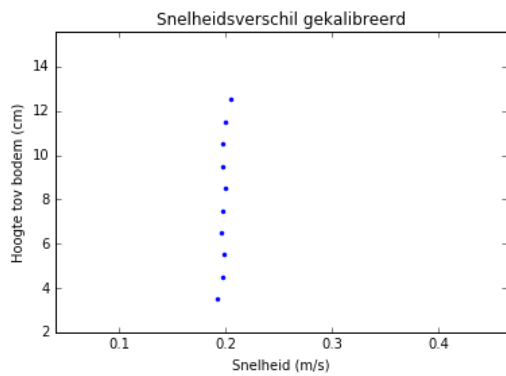


Figuur 9.38: Snelheden opstelling Fa0010LB

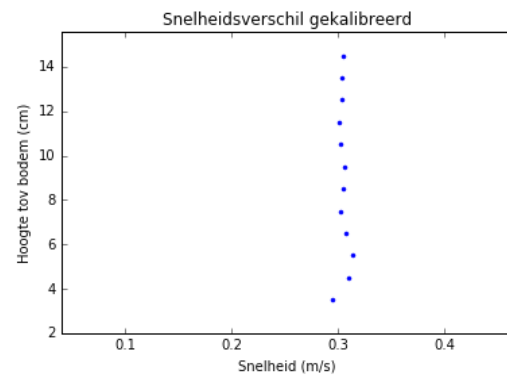
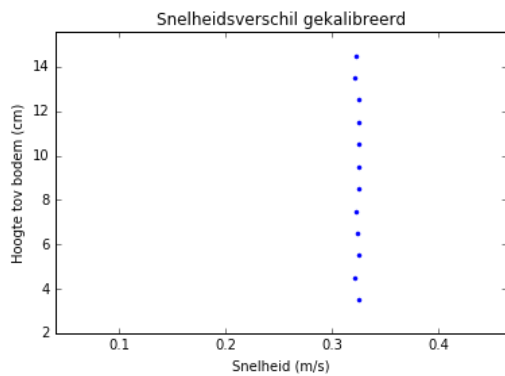


Figuur 9.39: Snelheden opstelling Fa0010LS

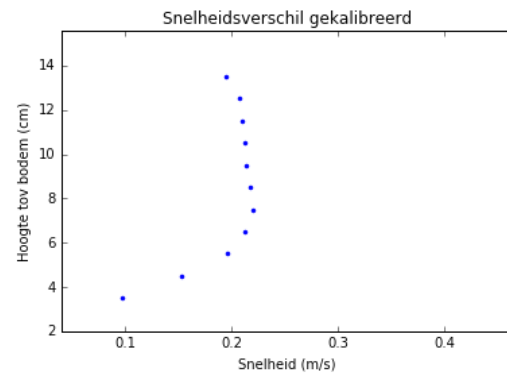
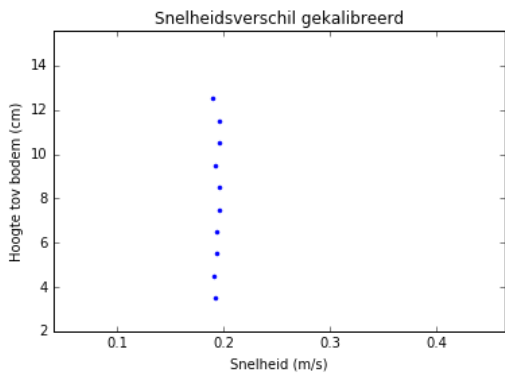
Bijlage 8: Snelheidsprofiel



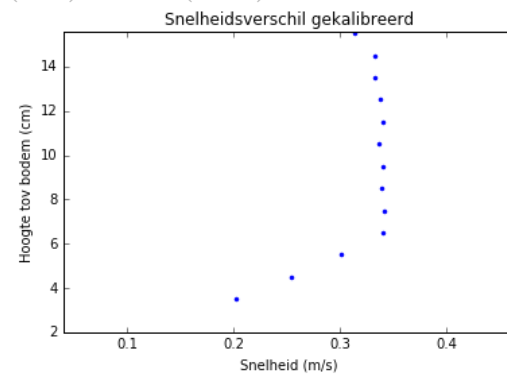
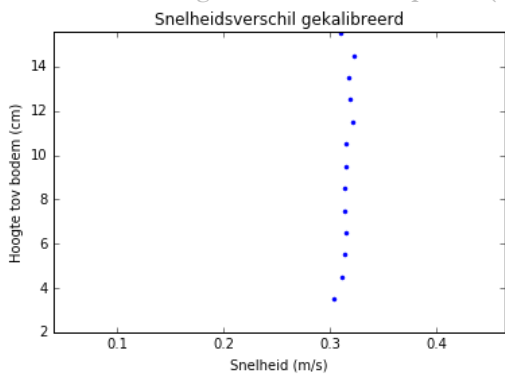
Figuur 9.40: Snelheidsprofiel (0.2 m/s) voor(links) en achter(rechts) Ab10101



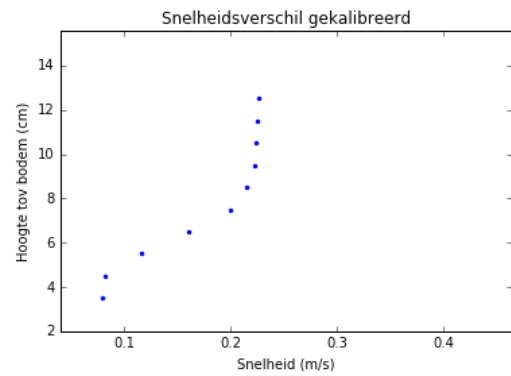
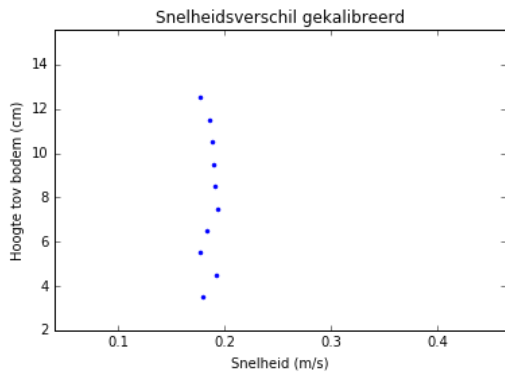
Figuur 9.41: Snelheidsprofiel (0.3 m/s) voor(links) en achter(rechts) Ab1010



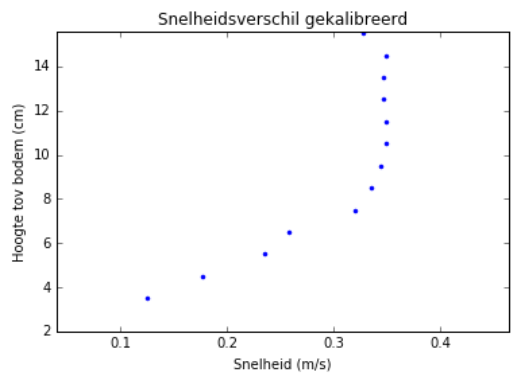
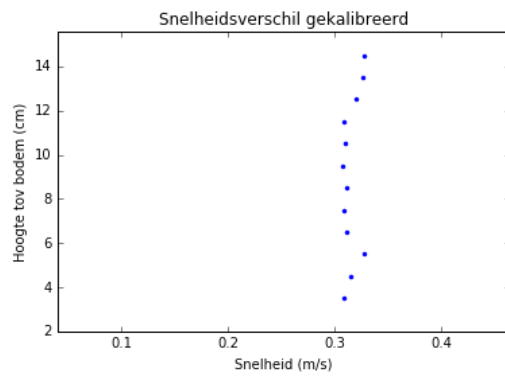
Figuur 9.42: Snelheidsprofiel (0.2 m/s) voor(links) en achter(rechts) Bb1020



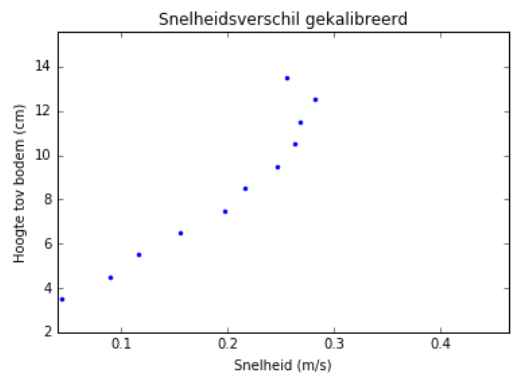
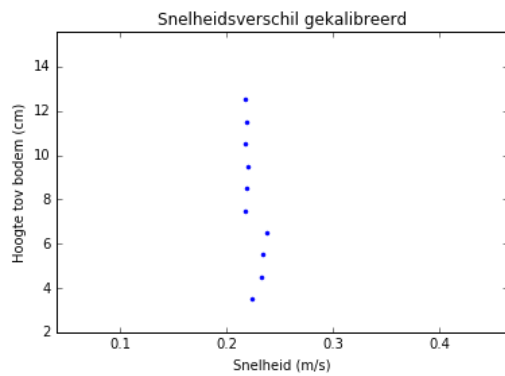
Figuur 9.43: Snelheidsprofiel (0.3 m/s) voor(links) en achter(rechts) Bb1020



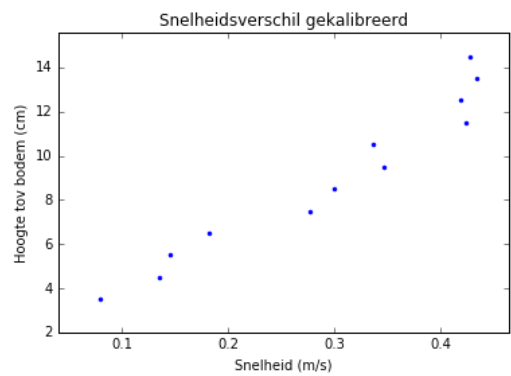
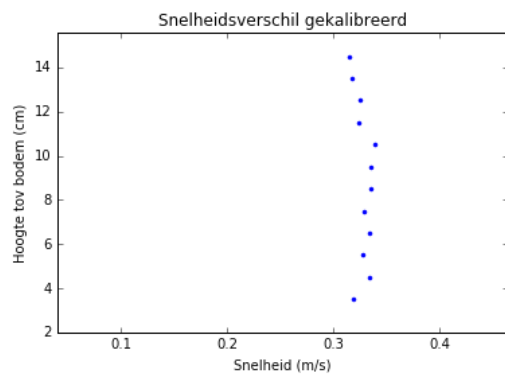
Figuur 9.44: Snelheidsprofiel (0.2 m/s) voor(links) en achter(rechts) Bb1030



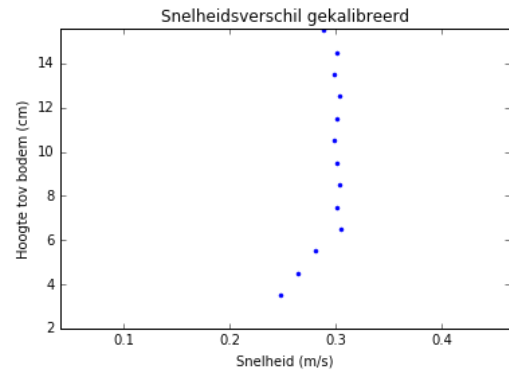
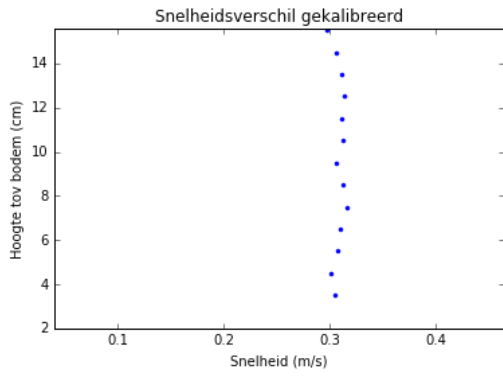
Figuur 9.45: Snelheidsprofiel (0.3 m/s) voor(links) en achter(rechts) Bb1030



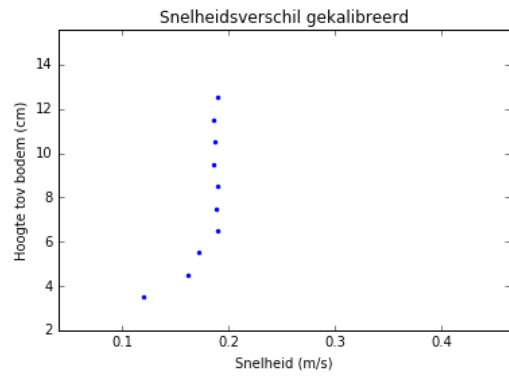
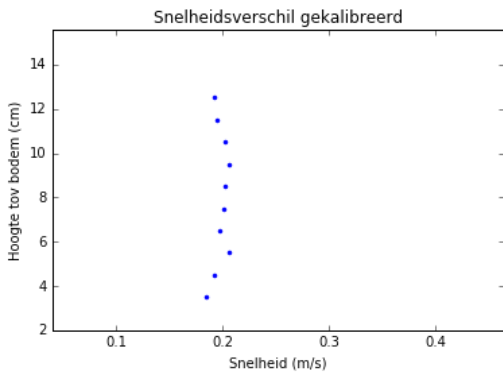
Figuur 9.46: Snelheidsprofiel (0.2 m/s) voor(links) en achter(rechts) Ca1040#



Figuur 9.47: Snelheidsprofiel (0.3 m/s) voor(links) en achter(rechts) Ca1040#



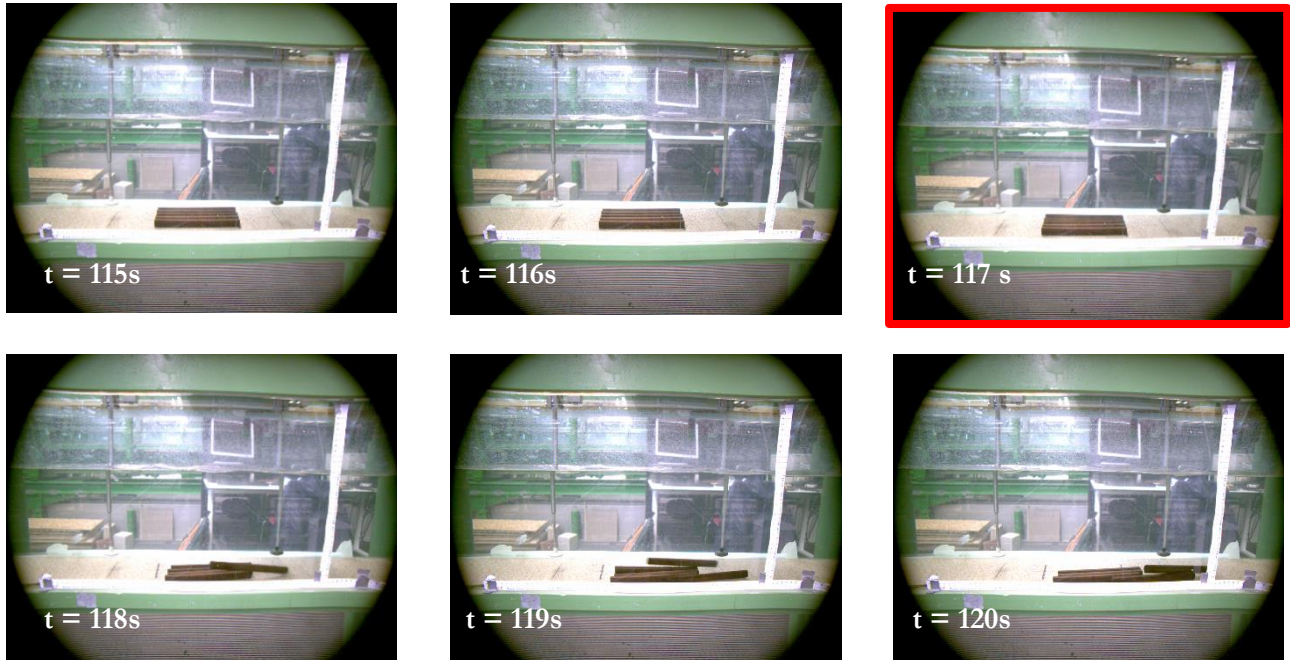
Figuur 9.48: Snelheidsprofiel (0.2 m/s) voor(links) en achter(rechts) Db1020



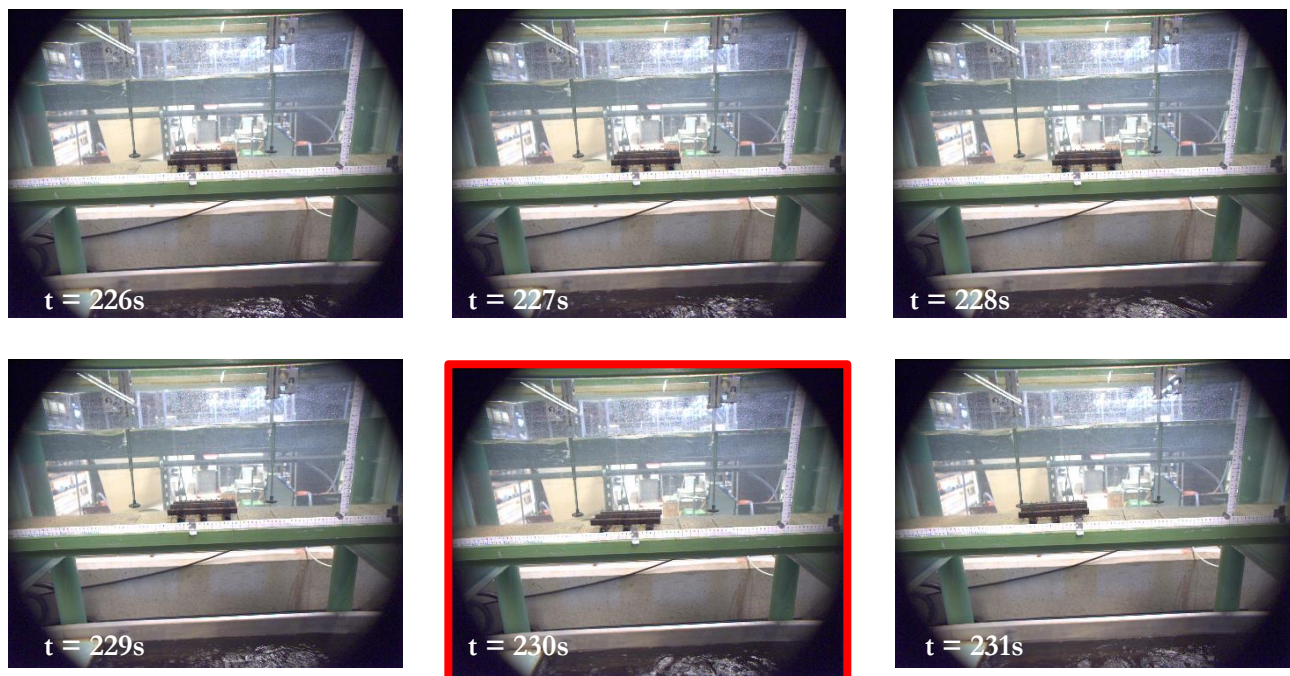
Figuur 9.49: Snelheidsprofiel (0.3 m/s) voor(links) en achter(rechts) Db1020

Bijlage 9: Bezwijkmechanismen

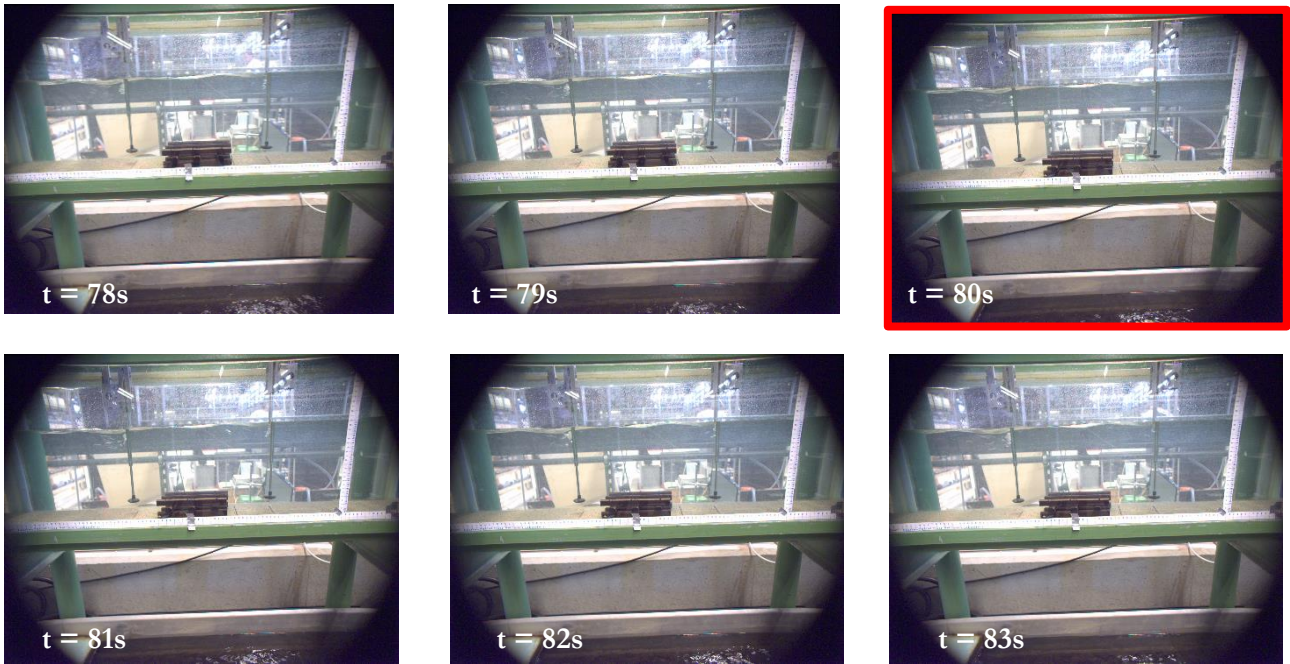
De foto met de rode rand laat zien waar de constructie begint met bezwijken. De foto's met een blauwe rand laten zien waar een constructie in een nieuw evenwicht komt.



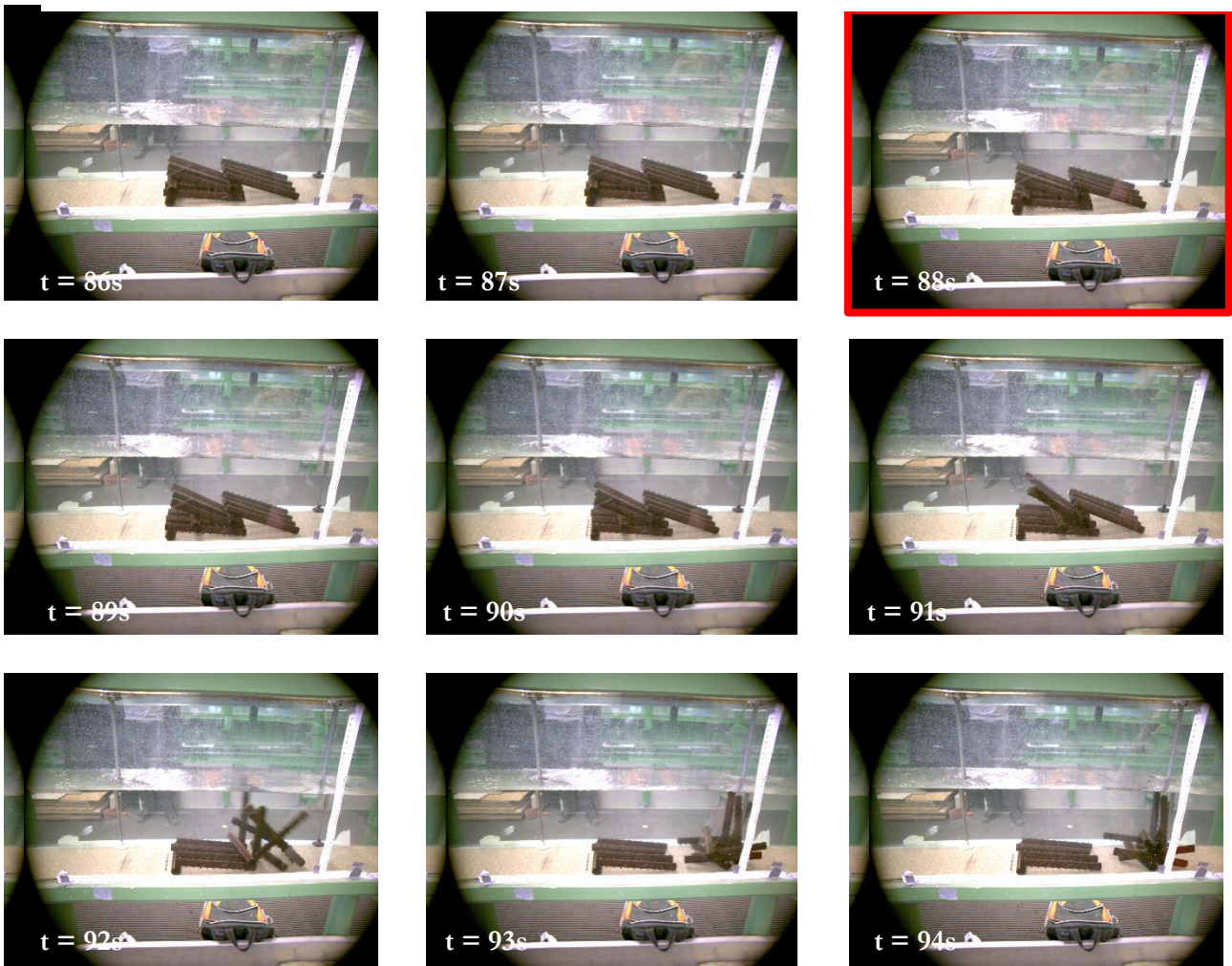
Figuur 9.50: Bezwijkmechanisme opstelling variatie A



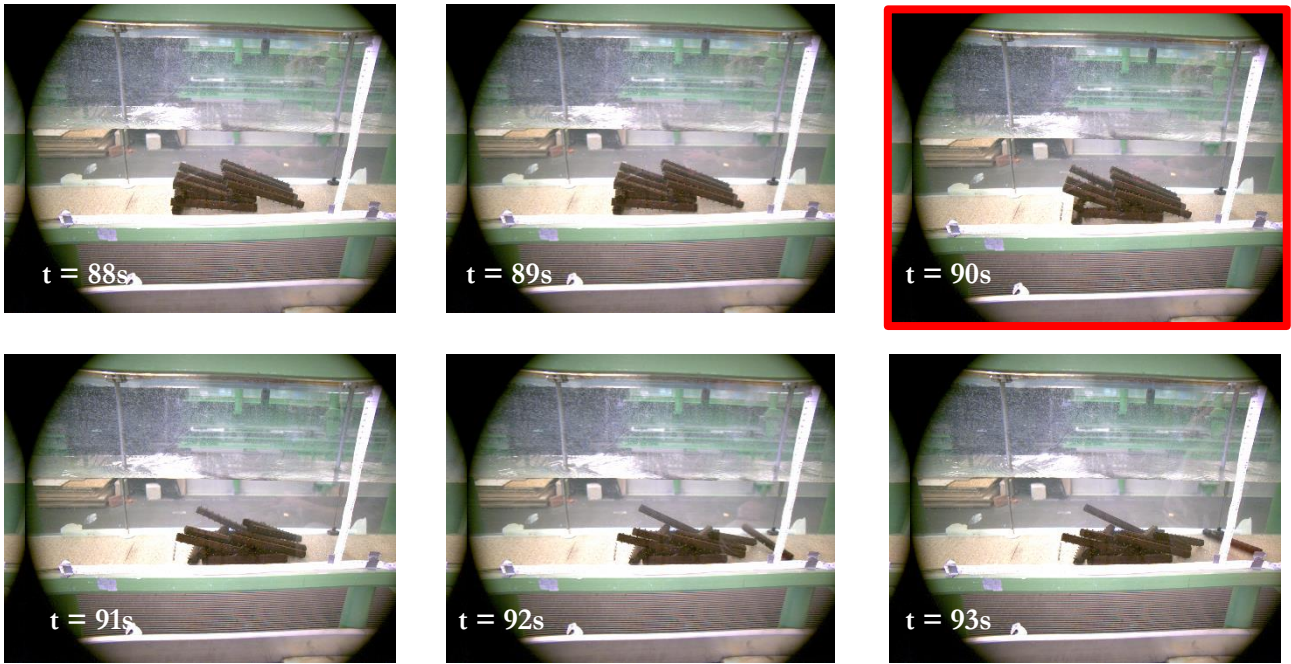
Figuur 9.51: Bezwijkmechanisme 1 opstelling variatie B



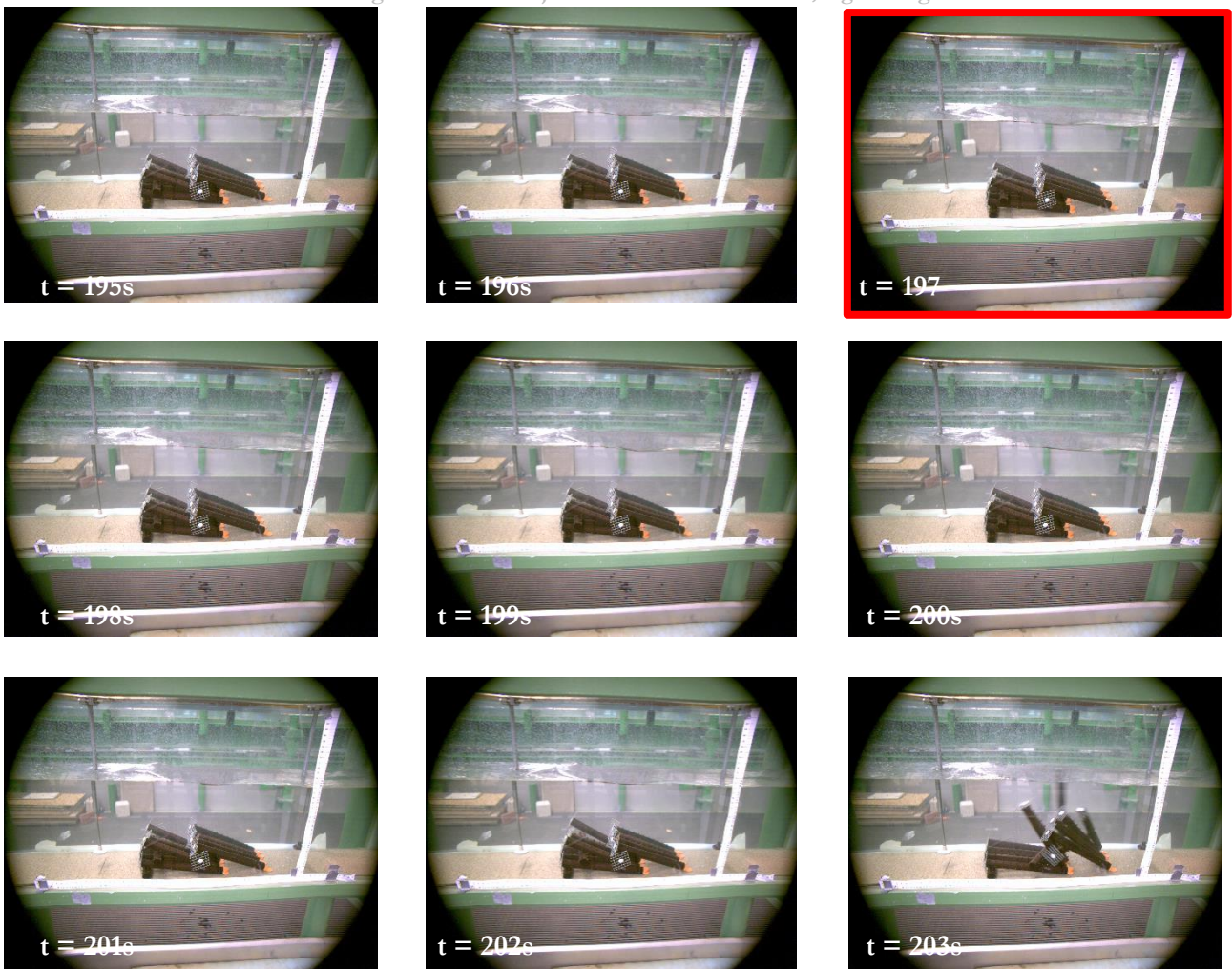
Figuur 9.52: Bezwijkmechanisme 2 opstelling variatie B



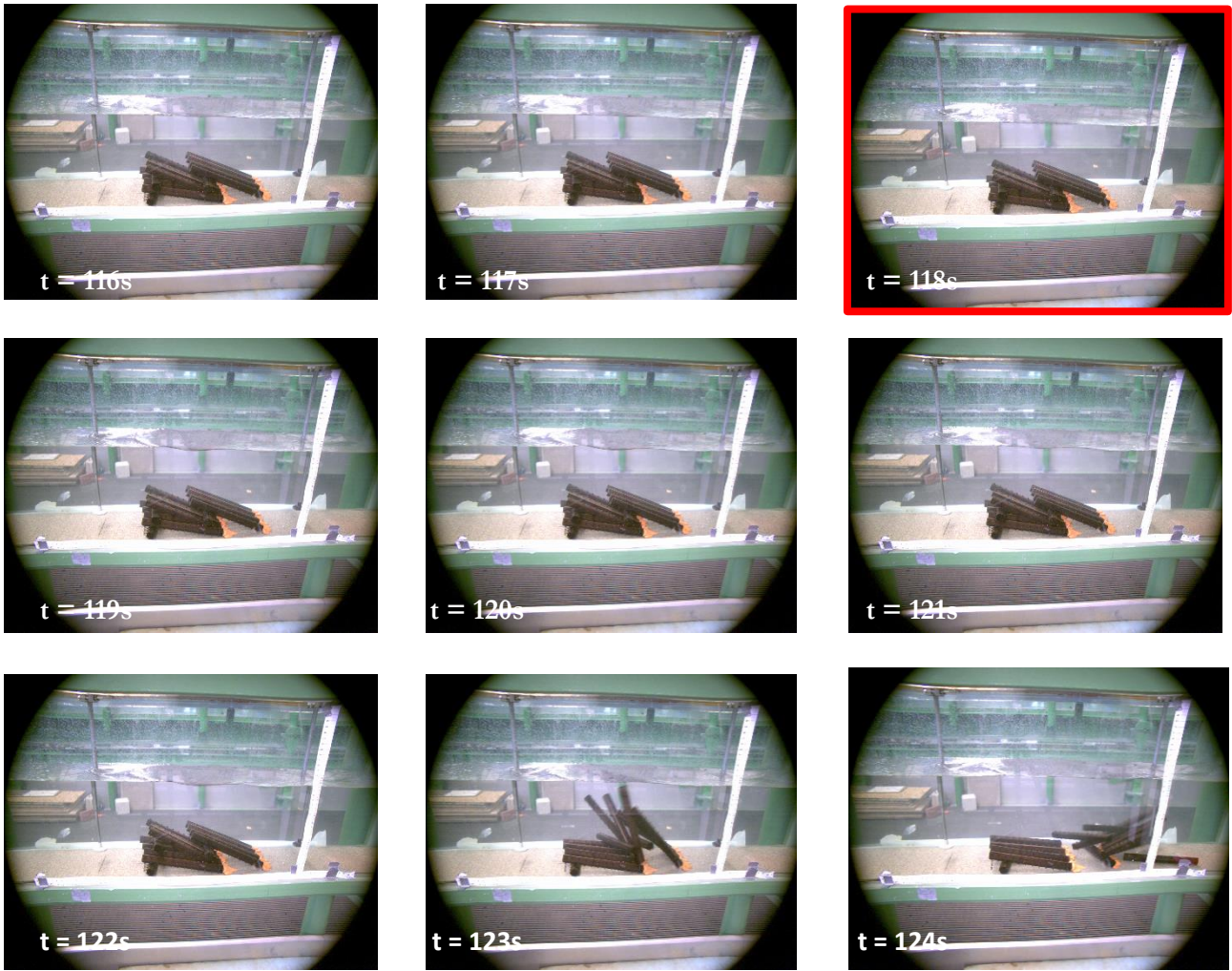
Figuur 9.53: Bezwijkmechanisme 1 variatie C, 0 graden gedraaid



Figuur 9.54: Bezwijkmechanisme 2 variatie C, 0 graden gedraaid



Figuur 9.55: Bezwijkmechanisme variatie Ca1040*V



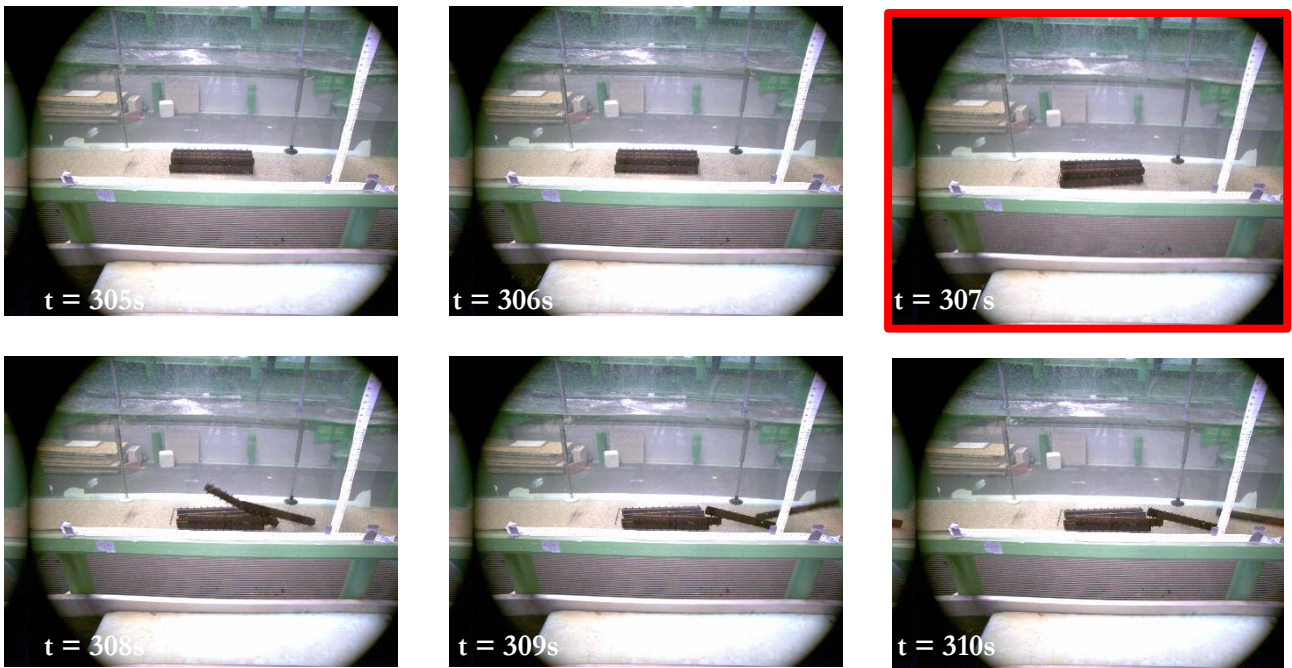
Figuur 9.56: Bezwijkmechanisme variatie Ca1040V



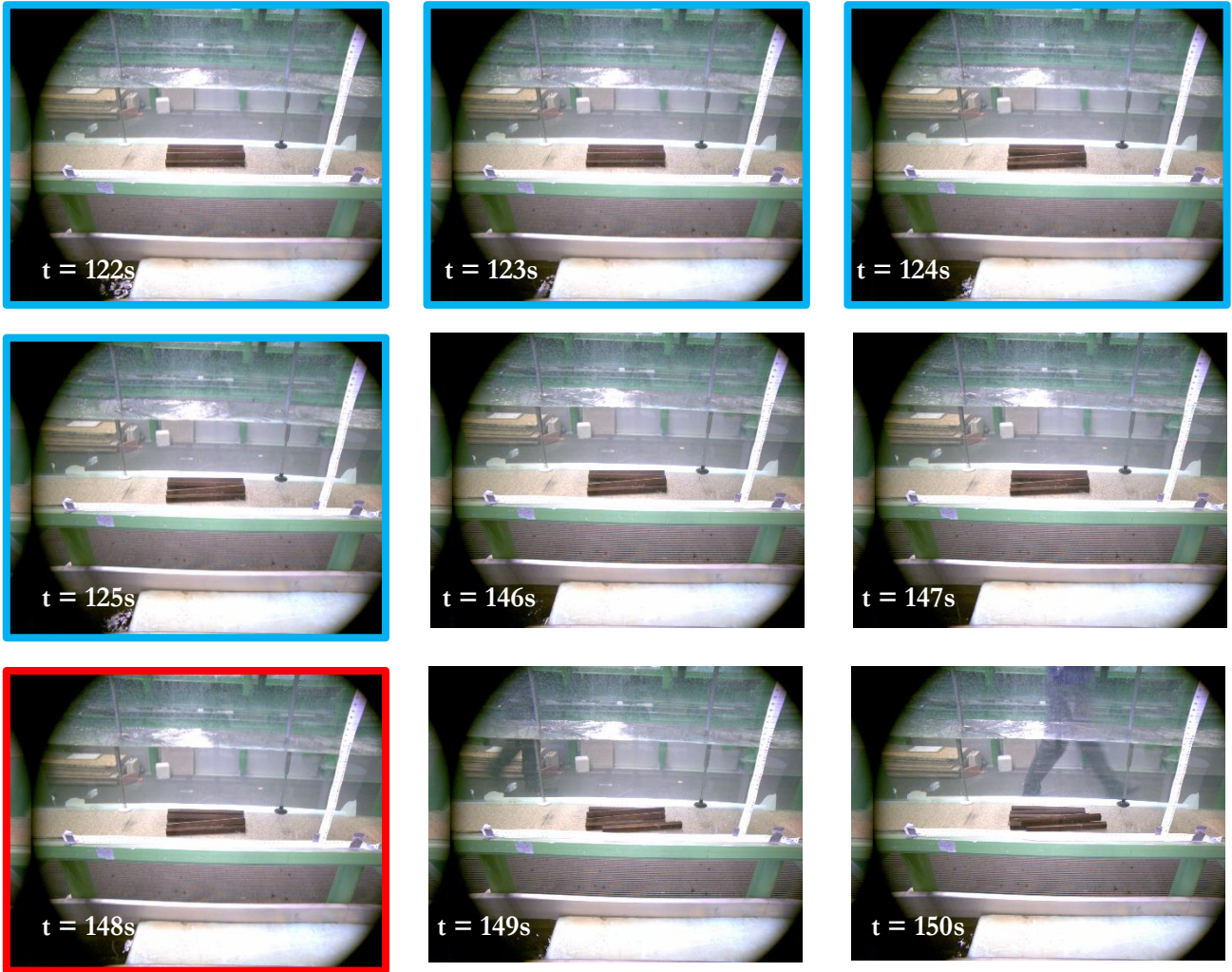
Figuur 9.57: Bezwijkmechanisme variatie Ca1042



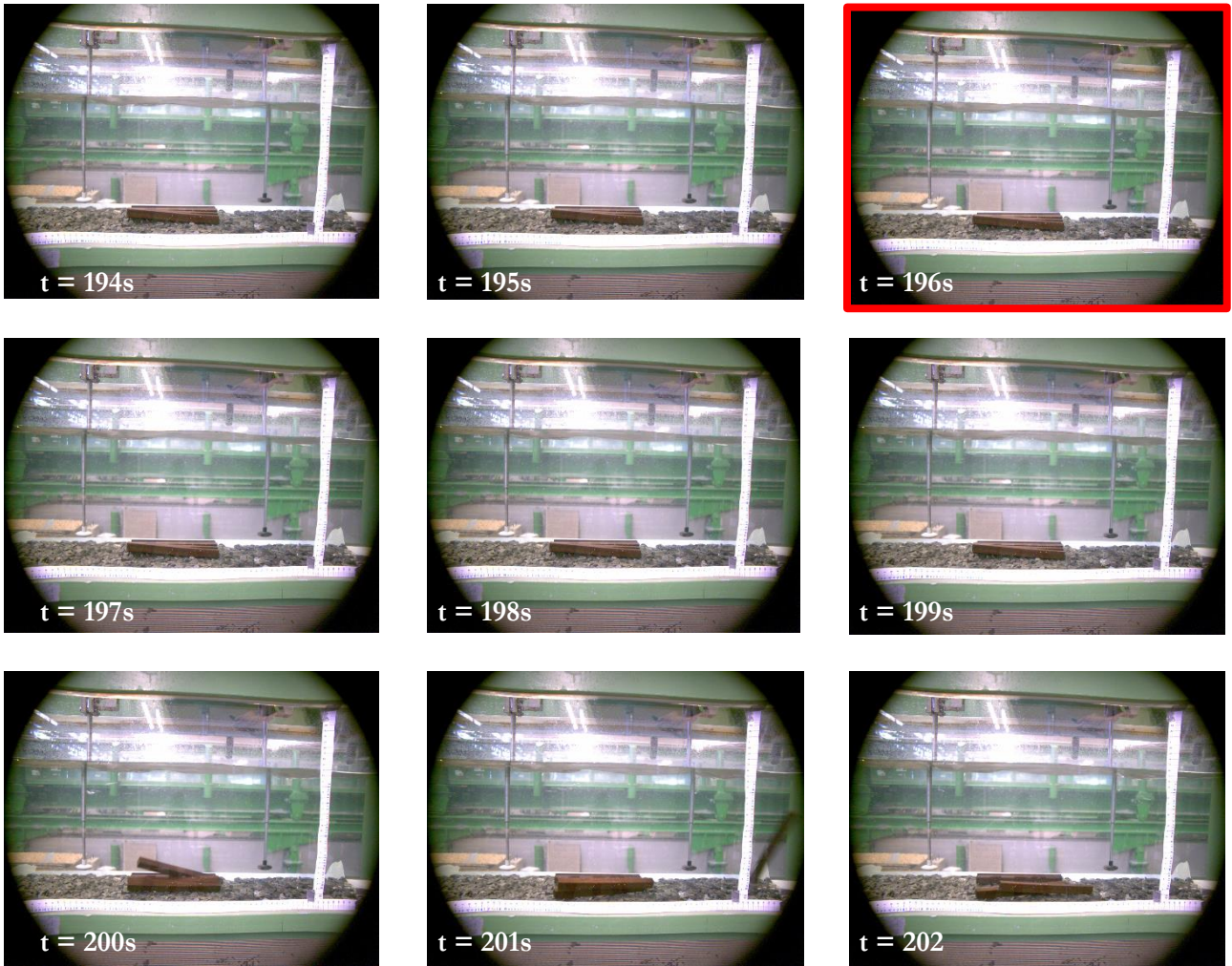
Figuur 9.58: Bezwijkmechanisme variatie C1042V



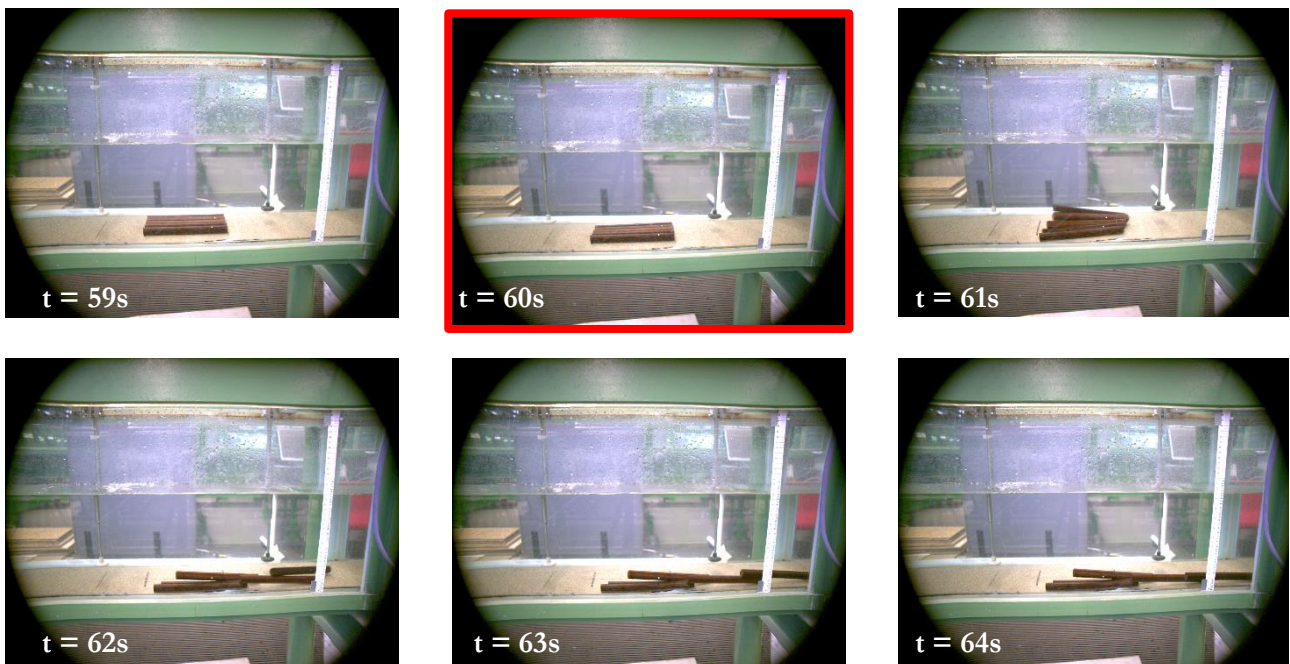
Figuur 9.59: Bezwijkmechanisme 1 variatie D



Figuur 9.60: Bezwijkmechanisme 2 variatie D, constructie komt opnieuw in evenwicht (blauw)



Figuur 9.61: Bezwijkmechanisme variatie E



Figuur 9.62: Bezwijkmechanisme 2 variatie F



Figuur 9.63: Bezwijkmechanisme 2 variatie F