



Onderzoek Meetopstelling Valhelmen Epilepsie

Antoine Piret, 19108796

De Haagse Hogeschool, Den Haag

Mens en Techniek | Bewegingstechnologie Faculteit
gezondheid, voeding en sport

Voorwoord

Dit onderzoek is uitgevoerd door Antoine Piret, een vierdejaars student Bewegingstechnologie aan de Haagse Hogeschool, als onderdeel van zijn afstudeerproject gedurende een periode van dertig weken bij OIM Orthopedie.

Bij deze gelegenheid wil ik graag mijn dank uitspreken aan OIM Orthopedie voor hun waardevolle ondersteuning gedurende deze periode. In het bijzonder wil ik mijn dankbaarheid uiten aan Lysanne de Jong, die als begeleider vanuit OIM Orthopedie heeft bijgedragen aan het succes van dit onderzoek. Daarnaast wil ik graag Johan de Jonge en Peter de Groot, productmanagers bij OIM, bedanken voor hun waardevolle technische bijdrage en assistentie gedurende het onderzoek. Tot slot wil ik Aad Lagerberg, mijn docentbegeleider aan de Haagse Hogeschool, bedanken voor zijn voortdurende steun en begeleiding.

De inzet en betrokkenheid van deze individuen hebben een cruciale rol gespeeld bij het succesvol uitvoeren van dit onderzoek. Hun deskundigheid en ondersteuning hebben bijgedragen aan de kwaliteit en het resultaat van dit project.

Den Haag, juni 2023

De Haagse Hogeschool



OIM Orthopedie



Samenvatting

Er is nog geen specifiek onderzoek gedaan naar valhelmen voor epilepsiepatiënten, waardoor het beschermingsniveau van deze helmen onbekend is. Het ontbreken van specifieke criteria belemmert de overstap naar moderne productiemethoden voor OIM. Voor dit probleem is een valmeetopstelling ontwikkeld, gebaseerd op normen en uitkomstmaten voor hoofdbeschadiging. Deze meetopstelling is specifiek ontworpen voor het onderzoeken van valhelmen.

Voordat de meetopstelling geïmplementeerd kan worden, is onderzocht hoe betrouwbaar deze de eigenschappen meet. De onderzoeksvraag was: *Hoe nauwkeurig genereert de eerder ontwikkelde valopstelling, met bijbehorende hoofdvorm, bij herhaald gebruik en onder dezelfde condities, dezelfde resultaten?*

Om deze vraag te beantwoorden, zijn er drie soorten metingen uitgevoerd: betrouwbaarheidsmetingen van de meetopstelling en hoofdvorm en metingen met de valhelm.

Er werden significante verschillen waargenomen bij de betrouwbaarheidsmetingen van de meetopstelling, zowel tussen de meetmomenten ($p = 0,014$) als tussen de valhoogten ($p < 0,001$). Voor de betrouwbaarheidsmetingen van de hoofdvorm werden eveneens significante verschillen vastgesteld tussen de meetmomenten ($p = 0,008$), verschillende hoofdposities ($p < 0,001$) en de interactie tussen deze twee variabelen ($p = 0,003$). Bovendien werden bij de metingen van de valhelm significante verschillen gevonden tussen de valhoogten ($p < 0,001$).

De resultaten tonen aan dat de eerder ontwikkelde valopstelling, inclusief de hoofdvorm, niet betrouwbaar is. Herhaald gebruik onder dezelfde condities leidt niet tot consistente resultaten, zowel voor de valopstelling op zichzelf als met de hoofdvorm. Dit geeft aan dat er verbeteringen nodig zijn in zowel de valopstelling als de hoofdvorm, of in de toegepaste betrouwbaarheidstesten. De positionering van de hoofdvorm op de ondersteuning heeft duidelijk effect gehad op de betrouwbaarheidsmetingen. Bij bepaalde posities werden hogere eindsnelheden gemeten, wat impliceert dat de positionering een belangrijke factor is om rekening mee te houden bij het beoordelen van valhelmen.

In conclusie draagt dit onderzoek bij aan de wetenschappelijke kennis over valhelmen voor epilepsiepatiënten. Het benadrukt de noodzaak van verbeteringen in de meetopstelling en hoofdvorm, het gebruik van geschikte uitkomstmaten en het legt een solide basis voor toekomstige ontwikkelingen en onderzoek.

Inhoudsopgaven

Onderzoek Meetopstelling Valhelmen Epilepsie.....	1
Voorwoord	2
Samenvatting	3
1. Inleiding.....	6
2. Methode.....	9
2.1 Hoofdvorm en valhelm	9
2.2 NGIMU.....	9
2.3 Dataverzameling	10
2.3.1 Betrouwbaarheid	10
2.3.2 Metingen valhelmen.....	11
2.4 Dataverwerking.....	12
2.4.1 Data-analyse	12
2.4.2 Statistische analyse.....	13
3. Resultaten	15
3.1 Betrouwbaarheid Meetopstelling zonder hoofdvorm	15
3.2 Betrouwbaarheid Meetopstelling inclusief hoofdvorm	16
3.3 Valhelm	17
4. Discussie	18
4.1 Resultaten onderzoek.....	18
4.2 Meetopstelling en hoofdvorm	19
4.3 Aanbevelingen	19
5. Conclusie	22
Literatuurlijst.....	23
Bijlage 1: Overzicht Normen.....	26
Bijlage 2: Hoofdbeschadiging Criteria	28
Bijlage 3: Hersenschudding risico voor verschillende hoofdbeschadiging criteria.....	31
Bijlage 4: Meetopstelling	32
Bijlage 5: Ontwikkeling Hoofdvorm	33
Bijlage 6: Meetprotocol Betrouwbaarheid Meetopstelling	35
Bijlage 7: Meetprotocol Betrouwbaarheid Hoofdvorm	36
Bijlage 8: Meetprotocol Valhelm.....	38
Bijlage 9: Aftekenen Positie hoofdvorm en valhelm	40
Bijlage 10: Matlabscripts	42
Bijlage 11: Resultaten Betrouwbaarheid Meetopstelling	53
Bijlage 12: Resultaten Betrouwbaarheid Hoofdvorm	59

Bijlage 13: Resultaten Metingen Valhelm.....	64
Bijlage 14: Plots voor snelheid val.....	66
Bijlage 15: Berekening Impactversnelling.....	76
Bijlage 16: Overzicht Wrijvingskrachten	77
Bijlage 17: Gebruiksprotocol Meetopstelling valhelmen (OIM)	78

1. Inleiding

In Nederland zijn naar schatting ongeveer 84.000 mensen gediagnosticeerd met epilepsie, wat neerkomt op een prevalentie van 4,9 per 1000 personen (Ngugi et al., 2010). Bij mensen met een verstandelijke beperking komt epilepsie echter driemaal vaker voor (Wie Krijgt Epilepsie En Op Welke Leeftijd?, 2022).

Epilepsie kent verschillende soorten aanvallen. Sommige aanvallen worden gekenmerkt door korte perioden van afwezigheid (absence), waarbij de persoon voor zich uit staart. Andere aanvallen kunnen heftigere effecten hebben, zoals tonisch-clonische aanvallen, waarbij er verstijving, schokken en bewusteloosheid optreden (Epilepsie - UMC Utrecht, z.d.). Bij dergelijke aanvallen vallen mensen vaak neer (Mollaoğlu et al., 2013; Asadi-Pooya et al., 2012a; Deekollu et al., 2005). Deze vallen kunnen uiteindelijk permanente schade veroorzaken. Om hoofdletsel te voorkomen, produceren orthopedische bedrijven zoals OIM Orthopedie valhelmen.



Figuur 1: Valhelm epilepsie
Opmerking. OIM Orthopedie, zd.
(<https://nl.pinterest.com/pin/450641506439420505/>)

Er is echter nog geen specifiek onderzoek gedaan naar de mate van bescherming die valhelmen voor epilepsiepatiënten bieden (Jory et al., 2019). Hierdoor ontbreekt een duidelijk beeld van de mate waarin deze helmen bescherming bieden voor het hoofd. In tegenstelling tot bijvoorbeeld fietshelmen en motorhelmen, zijn er geen specifieke wettelijke normen en testmethoden waar een valhelm voor epilepsiepatiënten aan moet voldoen.

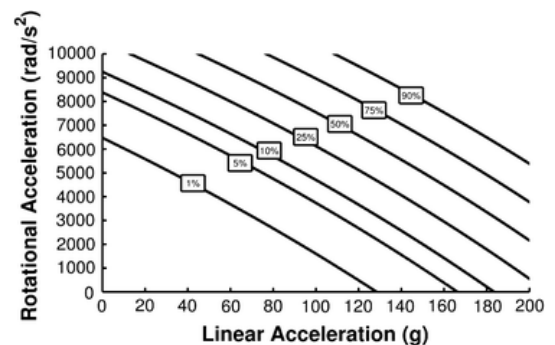
Voor andere soorten helmen worden verschillende normen gebruikt, zoals Snell's B95, ASTM F 1952, CPSC, EN-1078 (Europese norm) en EN1080 (Bicycle Helmet Safety Institute, z.d.). Deze normen specificeren niet alleen de valhoogte en snelheid, maar ook maximale G-krachten, impactenergie en de vorm van het hoofd die nodig zijn voor de meetopstelling en het onderzoek. De normen omvatten ook verschillende tests die de valhelm moet doorstaan, waaronder de belangrijke "impact attenuatie-test" (ook wel bekend als de "drop test"). Hierbij wordt de valhelm op een hoofdvorm bevestigd en wordt er een gecontroleerde val uitgevoerd met behulp van een monorail of parallelle kabels (Cachau-Hansgardh et al., 2021). Deze test meet het vermogen van de helm om energie te absorberen. Het is echter belangrijk op te merken dat de genoemde normen van toepassing zijn op helmen die bedoeld zijn om te worden vervangen na een enkele impact, waardoor ze als single-use items worden beschouwd (C.P.S.C 1998). Valhelmen voor epilepsiepatiënten moeten echter in sommige gevallen dagelijks meerdere impacts opvangen, waardoor het niet redelijk is om deze normen te gebruiken voor de ontwikkeling van criteria voor epilepsie valhelmen, maar eerder als inspiratie. In Bijlage 1 is een uitgebreid overzicht van de genoemde normen opgenomen.

Het ontbreken van specifieke criteria vormt een belemmering voor OIM bij de overstap naar hedendaagse productiemethoden. Steeds vaker wordt namelijk 3D-printen toegepast bij de productie van orthopedische hulpmiddelen. Om de overstap naar 3D-printen te kunnen maken, is het belangrijk dat de kwaliteit van de oorspronkelijke helm behouden blijft of (indien mogelijk) zelfs verbeterd wordt. Op basis van eerdere ervaringen blijkt namelijk dat de huidige helm goed voldoet. Om er zeker van te zijn dat de huidige eigenschappen van de helm behouden blijven bij een wijziging van de productiemethode, moet er een objectieve meetmethode worden ontwikkeld. Hiermee kunnen de eigenschappen van de huidige epilepsie valhelm in kaart worden gebracht en worden gebruikt bij de ontwikkeling en evaluatie van nieuwe 3D-geprinte helmen.

In het verleden is uitgebreid onderzoek verricht naar de verbanden tussen maximale resulterende lineaire/rotatoire versnelling en de kans op hoofdbeschadiging. Rowson et al. hebben lineaire versnellingen en hoekversnellingen gekoppeld aan de kans op een hersenschudding, uitgedrukt in percentages (2011). In Figuur 2 is te zien dat een combinatie van hogere lineaire versnelling en hoekversnelling een grote kans geeft op hersenschudding.

Bovendien heeft recent onderzoek van Rowson en Duma aangetoond dat zowel de lineaire versnelling op zichzelf als de combinatie van lineaire versnelling en hoekversnelling significant betere voorspellers zijn van hersenschudding in vergelijking met alleen de hoekversnelling (2013).

Er zijn diverse uitkomstmaten en modellen ontwikkeld voor de voorspelling en beschrijving van hoofdbeschadiging. Deze uitkomstmaten worden hoofdzakelijk bepaald door het meten van de versnellingen (in drie of zes vrijheidsgraden) waaraan het hoofd wordt blootgesteld tijdens een impact. De Head Injury Criterion (HIC) is een veelgebruikte uitkomstmaat die uitsluitend gebruikmaakt van de gemeten lineaire versnellingen (in drie vrijheidsgraden). De Head Impact Power (HIP) en het Generalized Acceleration Model for Brain Injury Threshold (GAMBIT) zijn voorbeelden van uitkomstmaten die zes vrijheidsgraden hanteren (naast drie lineaire versnellingen ook drie hoekversnellingen) om hoofdbeschadiging te beschrijven. In Bijlage 2 wordt een overzicht gegeven van de verschillende uitkomstmaten die de mate van hoofdbeschadiging aangeven. In Bijlage 3 is het verband tussen bovengenoemde uitkomstmaten en kans op hersenschudding weergegeven in de vorm van figuren.



Figuur 2: Overzicht van de kans op hersenschudding door verband lineaire versnelling en hoekversnelling. Opmerking. Overgenomen uit Brain Injury Prediction: Assessing the Combined Probability of Concussion Using Linear and Rotational Head Acceleration

Vanwege de vraag naar een specifieke meetmethode is tijdens een stage periode voorafgaand aan deze afstudeerstage een valmeetopstelling ontwikkeld, gebaseerd op de eerder genoemde normen en uitkomstmaten voor hoofdbeschadiging (Piret, 2022) (zie Figuur 3). Deze meetopstelling is speciaal ontworpen voor het onderzoeken van epilepsie valhelmen. De opstelling is hoofdzakelijk vervaardigd uit staal en kan eenvoudig gedemonteerd worden dankzij de acht buiskoppelingen waarmee de vier palen worden bevestigd aan de onder- en bovenplaat. De ondersteuning is geprint met stereolithografie (SLA) en vervaardigd uit PLA in combinatie met 30% gyroid-structuur (zie Figuur 4). Deze ondersteuning kan soepel langs de palen bewegen met behulp van twee ingedrukte en gesmolten lineaire kogellagers. Er zijn vier verstelbare oplegpunten in de ondersteuning aanwezig waar de hoofdvorm met epilepsie valhelm geplaatst kan worden. Deze oplegpunten kunnen in hoogte worden aangepast en vastgezet worden met boutjes die aan de zijkant van de ondersteuning kunnen worden geschroefd. Dankzij de verstelbaarheid kunnen de hoofdvormen onder verschillende hoeken worden geplaatst en kunnen verschillende maten epilepsie valhelmen worden onderzocht bij diverse valhoogtes.

De valgegevens worden verzameld met behulp van een Inertial Measurement Unit (IMU) die in de hoofdvorm wordt bevestigd. Vervolgens kan de valhelm op de hoofdvorm worden geplaatst en op de ondersteuning worden bevestigd. Gedurende de val en tijdens de impact zal de IMU de versnellingen en hoeksnelheden meten. Op basis van de gemeten versnellingsgegevens kunnen vervolgens specifieke uitkomstmaten (zoals HIC, HIP, GAMBIT) worden gekoppeld aan de valhelmen.



Figuur 3: Meetopstelling Valhelmen Epilepsie



Figuur 4: Ondersteuning hoofdvorm met valhelm

Bovengenoemde meetopstelling zal uiteindelijk gebruikt worden om de effectiviteit van de huidige epilepsie valhelmen in kaart te brengen en om nieuwe ontwerpen te testen. Voordat de meetopstelling geïmplementeerd kan worden, moet er onderzocht worden hoe betrouwbaar deze de eigenschappen meet. De volgende onderzoeksvraag is opgesteld: *Hoe nauwkeurig genereert de eerder ontwikkelde valopstelling, met bijbehorende hoofdvorm, bij herhaald gebruik, onder dezelfde condities, dezelfde resultaten?*

Een betrouwbare meetopstelling en hoofdvorm is immers een voorwaarde voor het onderzoeken van de epilepsie valhelmen.

Voor dit onderzoek zijn verschillende deelvragen geformuleerd die beantwoord dienen te worden:

1. Wat is de nauwkeurigheid waarmee de ondersteuning langs de palen beweegt?
2. Hoe betrouwbaar is de plaatsing van de IMU in de hoofdvorm?
3. Hoe betrouwbaar is de plaatsing van de hoofdvorm inclusief valhelm op de meetopstelling?

Het wordt verwacht dat de betrouwbaarheidsgegevens van zowel de meetopstelling als de hoofdvorm een normale verdeling zullen vertonen. Bovendien worden er geen significante verschillen verwacht binnen de gegevens van een enkel meetmoment, met identieke meetcondities. Verder wordt er verwacht dat er significante verschillen zullen worden gevonden tussen verschillende valhoogten en verschillende posities van het hoofd.

Na het verkrijgen van een positieve uitkomst bij de betrouwbaarheidstesten van de meetopstelling, zullen er metingen met de valhelm plaatsvinden.

Dit onderzoek zal niet alleen een belangrijke bijdrage leveren aan het begrip van de betrouwbaarheid van de meetopstelling, maar ook de weg vrijmaken voor verdere ontwikkelingen in het veld van epilepsie valhelmen. Het uiteindelijke doel is om de veiligheid en effectiviteit van deze helmen te behouden/verbeteren, en dit onderzoek draagt bij aan de fundamenteën die nodig zijn om dit te bereiken.

Daarnaast zal er een duidelijk protocol worden verstrekt voor het toekomstige gebruik van de meetopstelling met hoofdvorm, om de consistentie van het onderzoek te waarborgen.

2. Methode

In dit hoofdstuk wordt gedetailleerd beschreven hoe het onderzoek is uitgevoerd, inclusief de onderzoeksoepzet, het meetprotocol voor de betrouwbaarheidsmetingen en metingen van de valhelm, de dataverwerking en de relevante statistische analyses.

2.1 Hoofdvorm en valhelm

Voorafgaand aan het onderzoek naar de effectiviteit van valhelmen was het noodzakelijk om een geschikte hoofdvorm en bijpassende valhelm te ontwikkelen.

Het conceptuele ontwikkelingsproces van de hoofdvorm was reeds doorlopen tijdens het voorafgaande stage-ontwikkelpoject. Gedurende dit onderzoek werd er echter gestreefd naar de productie van een definitief product in samenwerking met OIM. Om de IMU te integreren, werd er een uitsparing in de hoofdvorm gemaakt. In de uitsparing werd een behuizing geplaatst, die gesloten kon worden met een deksel die in de behuizing geschoven kon worden en vervolgens vastgeschroefd. Een gedetailleerde beschrijving van het ontwikkelings- en productieproces van de hoofdvorm is te vinden in Bijlage 5.

Aanvankelijk was het plan om een gepersonaliseerde valhelm op maat te maken voor de geproduceerde hoofdvorm. OIM had echter een valhelm beschikbaar die uitstekend paste bij de proefpersoon en dus de overeenkomstige hoofdvorm. Deze valhelm was identiek aan de daadwerkelijke valhelmen die op maat gemaakt zouden worden.



Figuur 5: Hoofdvorm met valhelm

2.2 NGIMU

Voor dit onderzoek is er gebruik gemaakt van de NGIMU (Next Generation Inertial Measurement Unit). De NGIMU is een multifunctionele en krachtige IMU met opmerkelijke kenmerken en specificaties.

De NGIMU maakt gebruik van sensoren, waaronder versnellingsmeters, gyroscopen en magnetometers. In dit onderzoek is er alleen gebruik gemaakt van de versnellingssensor. Deze sensor heeft een sample rate van 400Hz en een breed meetbereik van $\pm 16g$ (NGIMU – X-io Technologies, n.d.). De NGIMU biedt verschillende methoden om versnelling terug te koppelen. Voor dit specifieke onderzoek is gebruik gemaakt van het ingebouwde sensorfusie-algoritme, wat ontworpen is om de acceleratie zonder de invloed van zwaartekracht te beschrijven binnen het sensorkader. Hierdoor wordt de zwaartekracht als het ware uitgefilterd, waardoor de versnelling met 1g naar beneden wordt verplaatst. Dit is duidelijk zichtbaar bij stilstand van de sensor, waar de baseline zich nu rond de 0g bevindt.

Dankzij de geoptimaliseerde sensorkalibratie levert de NGIMU nauwkeurige metingen van zowel beweging als oriëntatie. Bovendien maakt de NGIMU gebruik van Wi-Fi om draadloos verbinding te maken met andere apparaten (in dit onderzoek een laptop) voor de datatransmissie en real-time monitoring. Met zijn stevige en duurzame ontwerp is de NGIMU ontwikkeld om bestand te zijn tegen uitdagende omgevingsomstandigheden en langdurig gebruik. Dankzij bovengenoemde specificaties en veelzijdigheid was de NGIMU een waardevol instrument voor het uitvoeren van dit onderzoek.

2.3 Dataverzameling

Binnen dit onderzoek is er een uitgebreide dataverzameling uitgevoerd, waarbij talrijke metingen zijn verricht onder verschillende condities en verspreid over meerdere dagen. Om een gestructureerd overzicht te verkrijgen van dit proces, is er in Tabel 1 een overzicht gecreëerd.

Tabel 1: Overzicht vallen

	Betrouwbaarheid meetopstelling	Betrouwbaarheid hoofdvorm	Valhelm
Meetmomenten	3 (12-4, 17-4(2x))	2 (12-4, 17-4)	3 (17-4, 19-4, 25-4)
Valhoogten (m)	1,0, 1,5, 2,0	0,5 (2x)	0,5, 1,0
Positie IMU	Vast aan ondersteuning	Top, Voor, Achter, Rechts, Links	Top, Voor, Achter, Rechts, Links
Aantal vallen per valhoogte	12	12	8
Totaal aantal vallen	108 (3x3x12)	120 (2x2x5x12)	80 (3x2x5x8)

2.3.1 Betrouwbaarheid

Voordat de meetopstelling en de hoofdvorm gebruikt kunnen worden voor het onderzoeken van de valhelmen, moesten deze twee onderdelen gecontroleerd worden op betrouwbaarheid.

2.3.1.1 Meetopstelling

Allereerst is de meetopstelling zelf onderzocht om de betrouwbaarheid ervan te beoordelen. Het doel was om te bepalen of de ondersteuning consistent dezelfde eindsnelheid bereikte, wanneer deze vanaf dezelfde hoogte werd losgelaten. Om dit te bereiken, werd een IMU direct aan de ondersteuning bevestigd, zoals geïllustreerd in Figuur 6. Er werden drie verschillende valhoogtes getest: 1 m, 1,5 m en 2 m, waarbij er per hoogte twaalf vallen werden uitgevoerd. Om de hoogtes te markeren, werd een stukje tape tweemaal om de paal gewikkeld. Dit stuk tape fungeerde als startpositie voor de vallen van de ondersteuning, wat zorgde voor een consistente valhoogte aangezien de ondersteuning werd tegengehouden door het stuk tape tijdens het omhoog bewegen.



Figuur 6: Plaatsing IMU op ondersteuning

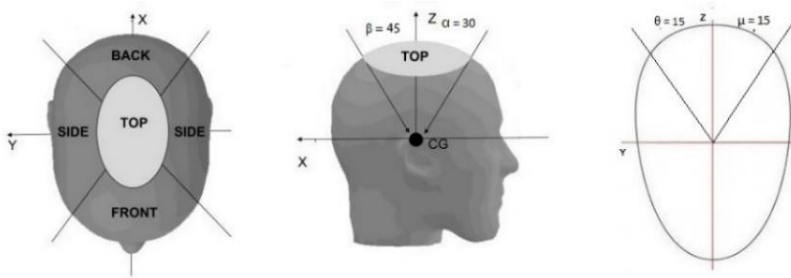
Om de betrouwbaarheid te vergroten, werd het meetprotocol op drie verschillende momenten herhaald, waarbij dezelfde meetcondities werden gehandhaafd zonder enige aanpassingen tussen de metingen. De enige potentiële factor die hierbij invloed kon hebben, was de tijd. In totaal zijn er 108 vallen uitgevoerd (Tabel 1). Het volledige meetprotocol voor deze betrouwbaarheidstest is te vinden in Bijlage 6.

Door gebruik te maken van de gegevens van de verschillende dagen, kon worden onderzocht wat de optimale werkwijze is voor het gebruik van de meetopstelling en konden passende aanbevelingen worden geformuleerd voor het gebruik van deze meetopstelling bij het testen van valhelmen.

2.3.1.2 Hoofdvorm

Vervolgens werd ook de geproduceerde hoofdvorm onderworpen aan een betrouwbaarheidsanalyse. Het doel was om te bepalen of de hoofdvorm betrouwbare data genereerde wanneer een IMU in de uitsparing was geplaatst. Hierbij werd onderzocht of de positie van de IMU binnen de hoofdvorm kon veranderen, wat zou kunnen leiden tot foutieve interpretatie van de gegevens.

De hoofdvorm werd bij deze betrouwbaarheidstest verdeeld in vijf zijden: Top (T), Voor (V), Achter (A), Rechts (R) en Links (L) (zie Figuur 7).

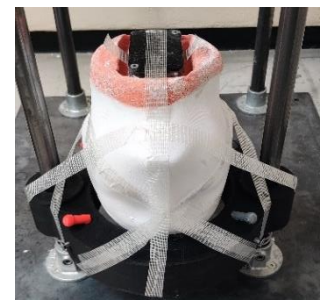


Figuur 7: Verdeling hoofdvorm (5 zijden: T,V,A,R,L)

De hoofdvorm, inclusief de IMU, werd onder deze specifieke hoeken aan de ondersteuning bevestigd. Om ervoor te zorgen dat de hoofdvorm tijdens de metingen niet kon bewegen ten opzichte van de ondersteuning, werd deze stevig vastgezet met tape, wat werd gecontroleerd door het geheel één keer te laten vallen (zie Figuur 8). Vervolgens werden er twaalf metingen uitgevoerd. Tijdens deze vallen was er geen impactpunt aanwezig zodat de hoofdvorm, bevestigd aan de ondersteuning, volledig kon meevallen tot de ondersteuning contact maakte met de veren. Verder mocht de hoofdvorm niet verschuiven ten opzichte van de ondersteuning. Deze procedure werd herhaald voor de overige vier zijden, resulterend in een totaal van zestig vallen.

Voor deze betrouwbaarheidsmetingen werd een valhoogte van 0,5 m gekozen. De keuze voor deze relatief lage hoogte is gebaseerd op de bevestiging van de hoofdvorm aan de ondersteuning, waardoor de impactkrachten, veroorzaakt door zowel de massa van de ondersteuning als de hoofdvorm, moesten worden opgevangen door de twee lagen die in de ondersteuning waren verwerkt. Het protocol voor deze betrouwbaarheidsmetingen werd op twee verschillende momenten uitgevoerd voor deze valhoogte, wat resulteerde in een totaal van 120 vallen (Tabel 1).

Het volledige meetprotocol voor deze betrouwbaarheidstest is te vinden in Bijlage 7.

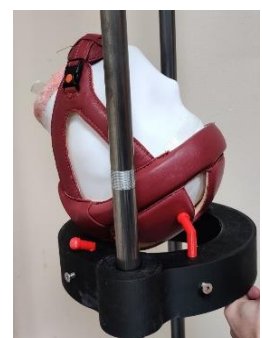


Figuur 8: Bevestiging hoofdvorm aan ondersteuning

2.3.2 Metingen valhelmen

Na het uitvoeren van de betrouwbaarheidstesten werd de focus verlegd naar het onderzoeken van de valhelmen. Bij deze metingen lag de hoofdvorm, inclusief valhelm, los op de ondersteuning. Met deze metingen moest er bepaald worden of de opstelling geschikt was om de benodigde valgegevens van de epilepsie valhelmen te verzamelen.

Voor deze metingen werd een vergelijkbaar meetprotocol gebruikt als voor de betrouwbaarheidstest van de hoofdvorm. Een belangrijk aspect van de opstelling was dat de hoofdvorm, inclusief valhelm, los op de ondersteuning werd geplaatst. Deze aanpak werd gekozen om te onderzoeken of de plaatsing van de hoofdvorm inclusief valhelm betrouwbaar was. De opstelling was specifiek ontworpen om de huidige en toekomstige valhelmen er los op te kunnen plaatsen, waardoor de resultaten representatief zouden zijn voor realistische situaties. Verder was het impactpunt bij deze metingen stevig bevestigd aan de onderplaat. De vijf verschillende posities van het hoofd konden gerealiseerd worden door de vier steunpunten op de ondersteuning, die in hoogte te verstellen waren zoals te zien in Figuur 9.



Figuur 9: Positionering Hoofdvorm/valhelm

Voor elke hoofdpositie werden acht vallen uitgevoerd, op hoogtes van 0,5m en 1,0m. Dit resulteerde in een totaal van 80 valtesten (Tabel 1). Het volledige meetprotocol voor deze metingen, inclusief de specifieke posities van de steunpinnen bij elke hoofdpositie, is te vinden in Bijlage 8.

2.4 Dataverwerking

2.4.1 Data-analyse

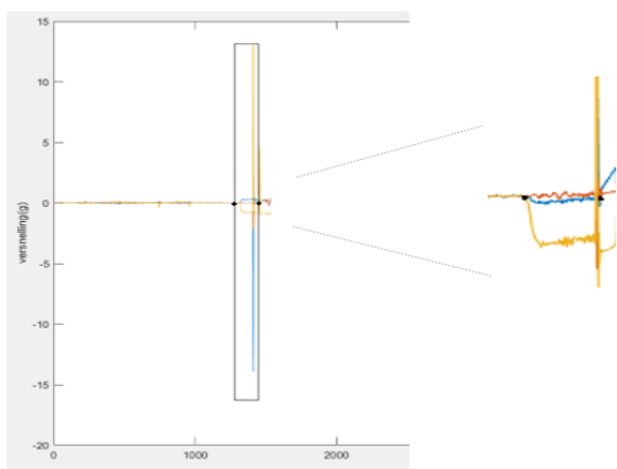
Na het uitvoeren van de metingen werd de IMU-data geanalyseerd met behulp van drie vergelijkbare Matlab-scripts. Deze scripts, te zien in Bijlage 10, zorgde voor het omzetten van de gemeten data naar een overzicht van de eindsnelheid, gemiddelde versnelling gedurende de val en valtijd.

De verwerking van de ruwe data begon met het omzetten naar leesbare gegevens in Matlab. Vanuit deze gegevens werd een tijdsvector ($t(s)$) gecreëerd en werden de lineaire versnellingen ($g's$) in de x-, y- en z-richtingen bepaald. Voor dit doel zijn de versnellingen gebruikt, waarbij de IMU de zwaartekracht ($1g$) uit het signaal heeft gefilterd, waardoor er bij stilstand een versnelling van $0g$ wordt teruggekoppeld. Dit is terug te zien in de baseline van de versnelling plots, zoals in Figuur 10.

Vervolgens werd de resulterende versnelling berekend door het kwadraat van de versnelling rond elke as te nemen, deze kwadraten bij elkaar op te tellen en ten slotte de wortel van het resultaat te nemen. Op deze manier kon een completer beeld gecreëerd worden van de totale versnelling die in de opstelling werd ervaren, aangezien de valrichting niet altijd overeenkwam met een van de assen van de sensor.

In dit onderzoek werden de versnellingen geplot en de momenten van de val geselecteerd door het begin en het einde van elke val aan te duiden. Het begin van de val werd bepaald aan de hand van de negatieve piek vanaf de baseline, terwijl het einde werd bepaald door de piek van de versnelling (zie Figuur 10). Om de valsnelheid te berekenen, werden de gemeten versnellingen geïntegreerd. Hierdoor kon de maximale resulterende snelheid worden gekoppeld aan de eindsnelheid van de val. Het exacte begin van de val werd bepaald door te identificeren wanneer de versnelling langs de z-as negatief werd, wat overeenkomt met het moment waarop de ondersteuning werd losgelaten. De indexen van het begin en einde van de val werden gebruikt om de gemiddelde versnelling gedurende de val en de valtijd te bepalen. Deze informatie droeg bij aan een gedetailleerde analyse van de valgegevens.

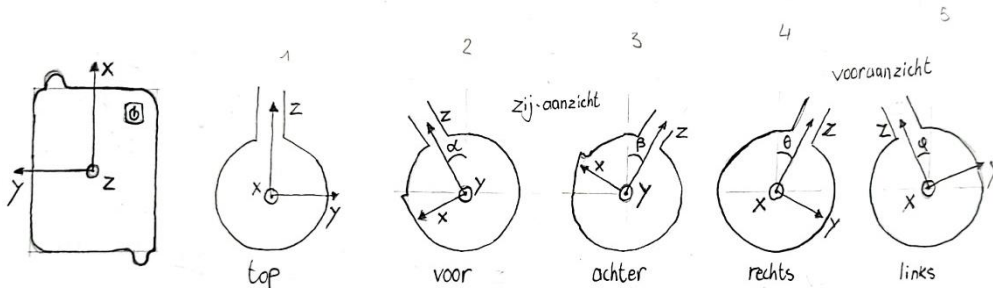
Indien er meerdere vallen in een meting waren uitgevoerd, werden alle metingen afzonderlijk geselecteerd en geanalyseerd.



Figuur 10: Selecteren val binnen figuur van versnelling

Bij de betrouwbaarheidsmeting van de meetopstelling werd alleen de lineaire versnelling en snelheid in de Z-richting gebruikt, aangezien de IMU aan de ondersteuning was bevestigd en dus alleen langs deze as bewoog. Voor de betrouwbaarheidsmeting van de hoofdvorm werden de resulterende versnelling en snelheid gebruikt, aangezien de hoofdvorm onder verschillende hoeken stond tijdens de val.

Bij de data-analyse moest er rekening gehouden worden met de plaatsing van de IMU in de hoofdvorm en het bijbehorende assenstelsel van de IMU (Figuur 11). Hierdoor was het beter te begrijpen waarom een uitkomstmaat in sommige gevallen positief of juist negatief was.



Figuur 11: IMU met bijbehorend assenstelsel en plaatsing in hoofdvorm

2.4.2 Statistische analyse

De in de data-analyse gevonden uitkomstmaten werden zorgvuldig onderzocht op betrouwbaarheid en samenhang in het programma IBM SPSS Statistics 29. Deze analyse bood waardevolle inzichten om te bepalen welke uitkomstmaten geen significante verschillen vertoonden bij verschillende meetmomenten, ondanks identieke vallen en condities.

2.4.2.1 Betrouwbaarheid Meetopstelling

Allereerst werd in SPSS gekeken of de verschildata van de drie meetmomenten een normale verdeling volgde. Dit werd bepaald met behulp van de Shapiro-Wilk test, waarbij een p-waarde groter dan 0,05 aangaf dat de data normaal verdeeld was. Vervolgens werden de ICC (Intraclass Correlation Coefficient) en Bland-Altman plots gebruikt om een beter beeld te krijgen van de variantie en correlatie in de data. De ICC kon waarden tussen 0 en 1 aannemen, waarbij lagere waarden ($<0,5$), waarden tussen 0,5 en 0,75, waarden tussen 0,75 en 0,9, en waarden groter dan 0,9 respectievelijk overeenkomen met "slecht", "gemiddeld", "goed" en "uitstekend" (Koo & Li, 2016). Er is hier gebruikt gemaakt van een Two-way random ICC, absolute overeenstemming, average measures. Deze combinatie is gekozen door de interesse in de mate van absolute overeenstemming tussen de metingen, waarbij er geen systematische verschillen mogen zijn tussen de meetmomenten.

Voor de betrouwbaarheidsmetingen van de meetopstelling werd een Two-way ANOVA (Analysis of Variance) uitgevoerd, waarbij het meetmoment ($N=3$) en de valhoogte ($N=3$) dienden als onafhankelijke variabelen en de eerder genoemde eindsnelheid ($N=108$) als afhankelijke variabele. Met behulp van deze ANOVA kon worden onderzocht of er een verband was tussen de meetmomenten en of de valhoogte invloed had op de resultaten.

2.4.2.2 Betrouwbaarheid Hoofdvorm

Voor de betrouwbaarheid van de hoofdvorm is de Shapiro-Wilk test uitgevoerd voor de verschildata tussen de twee meetmomenten, bij dezelfde hoofdvorm positie. Vervolgens werden ook hier de ICC en Bland-Altman plots gebruikt om een beter beeld te krijgen van de variantie en correlatie in de data.

Er is hier gebruik gemaakt van een Two-way random ICC, met consistency, bij average measures. We waren hier namelijk geïnteresseerd in de consistentie van de metingen, waarbij er systematische verschillen (plaatsing hoofdvorm) aanwezig mocht zijn tussen de meetmomenten.

Vervolgens werd er een Two-way ANOVA uitgevoerd, waarbij de meetmomenten (N=2) en de positie van het hoofd (N=5) als onafhankelijke variabelen werden gebruikt. Hier werd ook de eindsnelheid (N=120) als afhankelijke variabele gebruikt. Hiermee werd onderzocht of de positie van het hoofd een significant effect had op de gemeten versnellingen.

2.4.2.3 Valhelm

Op de data van de valhelm is ook een Two-way ANOVA uitgevoerd waarbij de valhoogten (N=2) en de positie van de hoofdvorm (N=5) als onafhankelijke variabelen werden gebruikt. Hier werd ook de eindsnelheid (N=80) als afhankelijke variabele gebruikt. Hiermee werd onderzocht of er een verband te vinden was tussen de verschillende valhoogten en hoofdvorm positie.

Na het uitvoeren van de Two-way ANOVA's bij de drie datasets werden de significante uitkomstmaten verder onderzocht met behulp van pairwise comparisons en/of post-hoc tests.

Door het uitvoeren van deze analyses kon er een duidelijk overzicht worden gecreëerd van de betrouwbaarheid van de gemeten data en werden bepaalde verbanden en verschillen in de resultaten zichtbaar. Indien de data niet normaal verdeeld was, werden de non-parametrische versies van de bovengenoemde tests uitgevoerd om betrouwbare conclusies te trekken.

3. Resultaten

3.1 Betrouwbaarheid Meetopstelling zonder hoofdvorm

In Tabel 2 is overzicht te zien van de gemiddelden met standaarddeviaties (SD's) van de valsnelheid, gemiddelde versnelling van de val en valsnelheid voor de drie verschillende valhoogten. Voor de valhoogten 1,0, 1,5 en 2,0 m zijn de gemiddelde eindsnelheden van $3,47 \pm 0,44$, $4,09 \pm 0,75$ en $4,46 \pm 1,04$ m/s gevonden.

Tabel 2: Gemiddelde + SD van drie meetmomenten voor versnellingen, snelheden en valtijd bij 3 verschillende valhoogten

	1,0 m	1,5 m	2,0 m
Eindsnelheid (m/s)	$3,47 \pm 0,44$	$4,09 \pm 0,75$	$4,46 \pm 1,04$
Gemiddelde versnelling (m/s ²)	$-6,22 \pm 0,87$	$-5,90 \pm 1,39$	$-4,85 \pm 1,22$
Valtijd (s)	$0,55 \pm 0,03$	$0,67 \pm 0,02$	$0,91 \pm 0,05$

Er is duidelijk te zien dat de eindsnelheid en valtijd toeneemt bij een verhoging van de valhoogte. In Figuur 12 is te zien dat ook de spreiding van de eindsnelheid toeneemt bij een toename van de valhoogte. De visualisaties voor de gemiddelde versnelling en valtijd zijn terug te vinden in Bijlage 11.

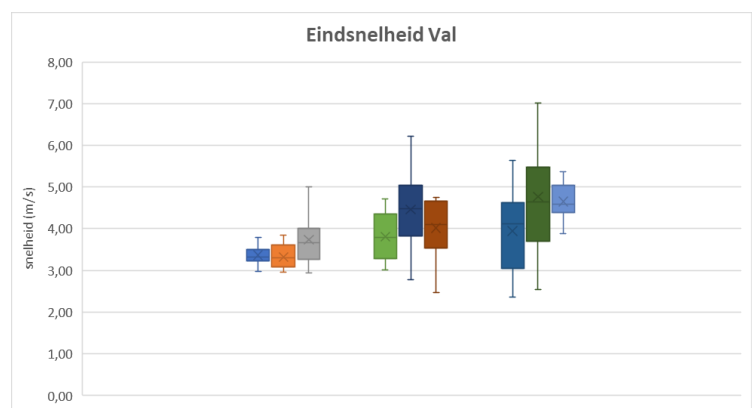
Bij het analyseren van de eindsnelheid waren de verschillen tussen de meetmomenten voor dezelfde valhoogte normaal verdeeld. Op de data van de drie meetmomenten zijn de ICC's berekend, wat resulteerde in de volgende waarden:

1,0m: -0,206, 1,5m: -0,021 en 2,0m = 0,471. Op de verschildata zijn ook ICC's berekend, wat resulteerde in de volgende waarden: 1,0m = 0,501, 1,5m = -0,020 en 2,0m = -0,102.

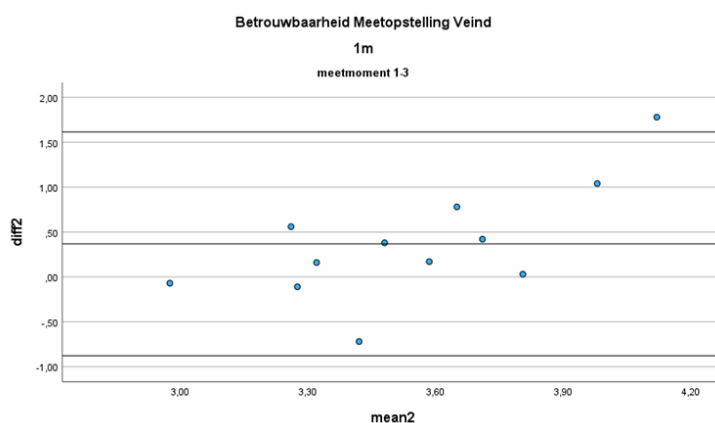
Bij de volgende Bland Altman plots was er een punt te vinden buiten de grenzen:

- 1,0 m: meetmoment 1-3 en 2-3
- 1,5 m: meetmoment 1-2 en 2-3
- 2,0 m: meetmoment 1-2

In Figuur 13 is een één van deze plots weergegeven en in Bijlage 11 zijn de rest van de plots te vinden.



Figuur 12: Boxplot eindsnelheden betrouwbaarheid meetopstelling voor 3 valhoogten



Figuur 13: Bland-Altman Plot voor verschil meetmoment 1-3 bij valhoogte 1,0m

Uit de Two Way ANOVA-analyse bleek dat er significante verschillen waren binnen de onafhankelijke variabele 'meetmomenten' ($p=0,014$) en 'valhoogte' ($p<0,001$). Gezien de significante verschillen binnen deze onafhankelijke variabelen, werden er "pairwise comparisons" uitgevoerd. De significante verschillen binnen de variabele 'meetmoment' werd veroorzaakt door de significante verschillen tussen meetmomenten 1-2 ($p=0,023$). De significante verschillen binnen 'valhoogte' werden veroorzaakt tussen de valhoogten 1,0m – 1,5m ($p=0,002$) en valhoogten 1,0m – 2,0m ($p<0,001$).

3.2 Betrouwbaarheid Meetopstelling inclusief hoofdvorm

In Tabel 3 is overzicht te zien van de gemiddelden met SD's van de valsnelheid, gemiddelde versnelling van de val en valsnelheid voor de vijf verschillende hoofdposities. Hierin is te zien dat voor de twee meetmomenten, met dezelfde valhoogte van 0,5m, bij de posities T, V, A, R en L gemiddelde eindsnelheden van $3,33\pm0,58$, $2,85\pm0,38$, $3,17\pm0,38$, $2,93\pm0,30$, $3,01\pm0,50$ m/s zijn gemeten. De grootste resulterende eindsnelheden zijn gemeten bij de positie T, bij meetmoment 2.

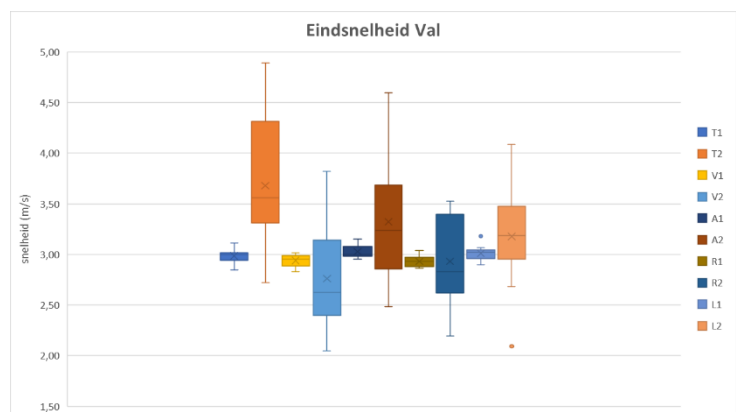
Tabel 3: Gemiddelden + SD van twee meetmomenten voor versnellingen, snelheden en valtijd bij verschillende hoofdposities

	TOP	VOOR	ACHTER	RECHTS	LINKS
Eindsnelheid (m/s)	$3,33\pm0,58$	$2,85\pm0,38$	$3,17\pm0,38$	$2,93\pm0,30$	$3,01\pm0,50$
Gemiddelde versnelling (m/s^2)	$7,97\pm0,62$	$8,24\pm0,61$	$7,16\pm0,74$	$7,28\pm1,98$	$7,56\pm0,80$
Valtijd (s)	$0,43\pm0,10$	$0,35\pm0,06$	$0,46\pm0,09$	$0,45\pm0,15$	$0,43\pm0,06$

In Figuur 14 is te zien dat er voor elke positie van het hoofd een grotere spreiding te vinden is binnen de data van meetmoment 2. De visualisaties voor de gemiddelde versnelling en valtijd voor beide meetmomenten zijn terug te vinden in Bijlage 12.

Tussen de twee meetmomenten, voor elke hoofdpositie, is er sprake van een hoge variantie binnen de data, wat resulteert in een zeer lage of zelfs negatieve ICC:

T: -0,054, V: 0,066, A: -0,53, R: -0,68 en L: -0,042.



Figuur 14: Boxplots eindsnelheden betrouwbaarheid hoofdvorm voor 2 meetmomenten

Voor de Posities V, A en L zijn er bij de Bland-Altman plots punten buiten de grenzen te vinden (zie Bijlage 12).

De Two-Way ANOVA toonde voor de gemeten eindsnelheid significante verschillen aan voor de onafhankelijke variabele 'meetmomenten' ($p = 0,008$), 'positie' ($p < 0,001$) en de interactie tussen Meetmomenten en Positie ($p = 0,003$). Gezien de significante verschillen binnen deze onafhankelijke variabelen, werden er "pairwise comparisons" uitgevoerd.

Er zijn significante verschillende gevonden tussen de volgende hoofdposities: T-V ($p=0,010$), V-A ($p<0,001$), V-R ($p<0,001$) en V-L ($p=0,005$). Deze significante verschillen waren allemaal te vinden binnen meetmoment 2. Verder waren er significante verschillen te vinden tussen de meetmomenten voor de hoofdposities: T ($p<0,001$), A ($p<0,001$) en R ($p<0,001$).

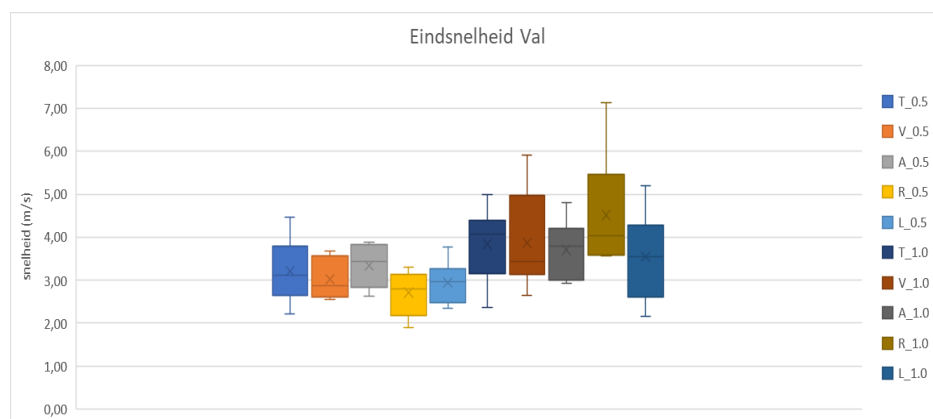
3.3 Valhelm

Voor de metingen met valhelm is in Tabel 4 een overzicht weergegeven met de gemiddelden en SD's voor de eindsnelheden, gemiddelde versnellingen en valtijd voor de vijf verschillende posities van het hoofd, bij de twee valhoogten.

Tabel 4: Gemiddelden + SD van eindsnelheden, gemiddelde versnellingen en valtijd voor verschillende posities van het hoofd bij 2 valhoogten

	TOP		VOOR		ACHTER		RECHTS		LINKS	
Valhoogte (m)	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
snelheid einde val (m/s)	3,21±0,73	3,84±0,84	3,02±0,46	3,87±1,15	3,34±0,49	3,70±0,67	2,71±0,52	4,51±1,30	2,95±0,47	3,55±1,02
Gemiddelde versnelling (m/s ²)	8,59±0,16	8,43±0,19	8,68±0,14	8,41±0,22	6,97±0,60	7,79±1,17	8,68±0,31	8,53±0,26	7,54±0,65	8,52±0,21
valtijd (s)	0,37±0,08	0,46±0,13	0,34±0,06	0,46±0,14	0,43±0,12	0,49±0,14	0,31±0,06	0,48±0,09	0,39±0,03	0,41±0,12

Figuur 15 toont een overzicht van de spreiding van de eindsnelheden. Het is duidelijk zichtbaar dat bij een valhoogte van 1,0m er voor elke positie een grotere spreiding is. De visualisaties voor de gemiddelde versnelling en valtijd voor beide valhoogten zijn terug te vinden in Bijlage 13.



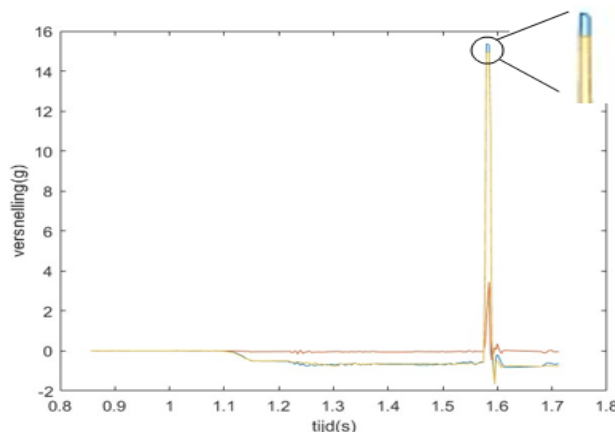
Figuur 15: Boxplots eindsnelheden Hoofdvorm inclusief valhelm voor 5 posities van het hoofd bij 2 verschillende valhoogten

Uit de Two Way ANOVA zijn er significante verschillen gevonden voor de eindsnelheid voor de onafhankelijke variabele 'valhoogten' ($p < 0,001$). Verder zijn er geen significante verschillen gevonden voor de onafhankelijke variabele 'positie' en de interactie tussen deze variabele en 'meetmomenten'.

4. Discussie

4.1 Resultaten onderzoek

In dit onderzoek is geconstateerd dat er incidenteel sprake is van clipping van de IMU bij hoge impactversnellingen. Verwacht wordt dat de impactversnellingen veel groter zijn dan de maximale waarde van 15g. Figuur 16 toont aan dat wanneer de maximale waarde wordt bereikt, de piek wordt afgevlakt en waarden boven dit maximum niet langer worden meegenomen. Vanwege deze afvlakking kon de impactversnelling niet worden gebruikt als uitkomstmaat in dit onderzoek. Door een tekort aan meetpunten rondom de piek, kon de impactversnelling ook niet geïnterpoleerd worden.



Figuur 16: Voorbeeld val met impact

Er kon echter een schatting worden gemaakt van de impactversnelling aan de hand van de tijdstippen waarop de eindsnelheid van de val werd bereikt (maximale resulterende snelheid net voor impact) en waar de snelheid nul is (tijdens de impactversnelling). Hierbij werd de maximale snelheid of eindsnelheid gedeeld door de tijdsduur waarin de snelheid van het maximum tot nul afnam. Voor de verschillende valhoogtes van 1,0 m, 1,5 m en 2,0 m resulteerden de berekende impactversnellingen in respectievelijk 10,46g, 10,78g en 12,83g. De impactversnellingen voor de betrouwbaarheid van de hoofdvorm en de metingen van de hoofdvorm inclusief valhelm zijn te vinden in Bijlage 15. Opmerkelijk is dat deze berekende impactversnellingen onder de 15g grens liggen. Op basis van deze bevindingen is het duidelijk dat er vervolgonderzoek nodig is om de impactversnellingen nauwkeuriger te bepalen.

De betrouwbaarheid van de metingen is geëvalueerd aan de hand van de ICC-methode. Opvallend was dat er veel waarden dicht bij nul en zelfs negatieve waarden werden gevonden. Deze bevinding werd veroorzaakt door de hoge variantie tussen de verschillende meetdagen en binnen de metingen van dezelfde dag. Enkele uitschieters in de data konden deze resultaten verklaren. De Bland-Altman plots waren nuttig bij het identificeren van deze uitschieters.

Bij het beoordelen van de betrouwbaarheid van de meetopstelling is gebleken dat het meetmoment en de valhoogte invloed hebben op de gemeten eindsnelheid. Naarmate de valhoogte toeneemt, neemt ook de spreiding in eindsnelheid toe. Deze toename kan worden verklaard door wrijvingskrachten. Bij een langere baan krijgen wrijvingskrachten meer tijd en ruimte om op de ondersteuning in te werken. Door middel van de gemeten gemiddelde versnellingen gedurende de val kon de wrijvingskracht worden bepaald met behulp van de tweede wet van Newton ($F = m \cdot a$). In Bijlage 16 wordt een overzicht gegeven van de wrijvingskrachten in elke situatie. Hieruit blijkt duidelijk dat de wrijvingskrachten toenemen naarmate de valhoogte wordt verhoogd.

Bij de analyse van de betrouwbaarheidsdata van de valopstelling inclusief hoofdvorm is een opmerkelijk patroon naar voren gekomen. Op elk van de hoofdposities zijn aanzienlijk grotere verschillen waargenomen in de data van meetmoment 2. Bovendien konden alle significante verschillen tussen de hoofdposities worden herleid tot meetmoment 2. Het is opvallend dat de hoofdpositie V in combinatie met andere hoofdposities verantwoordelijk was voor alle significante verschillen. Mogelijk kan het onjuist bevestigen van de hoofdvorm aan de ondersteuning de grotere spreiding verklaren. Deze bevinding biedt ook een mogelijke verklaring voor de significante verschillen die zijn gevonden bij de Posities T, A en R tussen de twee meetmomenten.

Bij de analyse van de valhelmdata is gebleken dat de valhoogte, vergelijkbaar met de betrouwbaarheidsdata van de meetopstelling, van invloed is op de resultaten. Het is opmerkelijk dat de positie van het hoofd geen invloed heeft op de data, in tegenstelling tot de bevindingen bij de betrouwbaarheidsmetingen van de hoofdvorm.

4.2 Meetopstelling en hoofdvorm

Voor dit onderzoek is er een bestaande meetopstelling gebruikt, maar enkele aanpassingen waren nodig om het onderzoek succesvol te laten verlopen. De meetopstelling moest uit elkaar gehaald en verplaatst worden naar een andere locatie om het onderzoek uit te voeren. Bij het opzetten van de meetopstelling moest ervoor gezorgd worden dat de lagers en palen in de ondersteuning goed werden gesmeerd, zodat de ondersteuning met zo min mogelijk weerstand langs de palen zou vallen.

Gedurende het onderzoek zijn enkele onderdelen vervangen en verbeterd. Met name voor de hoofdvorm is er een lang ontwikkelproces doorlopen, waarbij de methode van 'trial and error' is toegepast. Het huidige ontwerp vertoont nog steeds enige afbrokkeling van het gips bij het uitvoeren van veelvoudige vallen. In toekomstige onderzoeken kunnen verbeteringen van de hoofdvorm worden onderzocht, zoals het gebruik van sterke materialen met een lichtere massa. Het is echter belangrijk op te merken dat in dit onderzoek tientallen vallen werden uitgevoerd met dezelfde hoofdvorm en honderden vallen met de ondersteuning. In de toekomst zouden patiënten mogelijk hun eigen individuele hoofdvorm hebben en zou slechts een beperkt aantal vallen worden uitgevoerd. Deze onderdelen zullen dus minder frequent vervangen hoeven te worden.

Naast de hoofdvorm faalde de ondersteuning ook twee keer tijdens het onderzoek. Er is gekozen om de ondersteuning te maken van een relatief goedkoop materiaal, met het risico dat deze mogelijk moest worden vervangen. Bij vervolgonderzoek of het verbeteren van de meetopstelling kan worden gekeken naar een herontwerp van de ondersteuning, waarbij deze wordt verstevigd aan de bovenkant van de lagers. Ook kan er sterker materiaal en geavanceerdere 3D-printmethoden, zoals Multi Jet Fusion (MJF), overwogen worden, maar dit brengt wel hogere kosten met zich mee (2000/2500%).

Bovendien werd het impactpunt tijdens het onderzoek telkens bevestigd met tweecomponentenlijm, zodat het indien nodig kon worden losgemaakt voor de betrouwbaarheidsmetingen van de hoofdvorm. Vanwege het grote aantal vallen kwam het echter meerdere keren voor dat het impactpunt losraakte van de onderplaat. Voor toekomstig onderzoek naar valhelmen zou het ideaal zijn om het impactpunt aan de onderplaat te lassen, zodat het niet los kan komen door de vallen gedurende de tijd.

Dit onderzoek heeft een duidelijk beeld gegeven van het gebruik van de eerder ontwikkelde meetopstelling. Ondanks dat er enkele onderdelen herontworpen of opnieuw geproduceerd moesten worden, verliep het onderzoek voorspoedig en is elk struikelblok beschouwd als een leermoment in het ontwerpproces. Alle gemaakte fouten kunnen worden meegenomen in toekomstig onderzoek waarbij deze meetopstelling wordt gebruikt.

4.3 Aanbevelingen

In dit onderzoek is de betrouwbaarheid van de hoofdvorm getest door deze aan de ondersteuning te bevestigen en vanaf relatief lage hoogtes te laten vallen. Het beoordelen van de betrouwbaarheid van de hoofdvorm in algemene zin is echter een uitdaging, aangezien elke hoofdvorm gepersonaliseerd is om perfect op de individuele valhelm te passen. Om consistente resultaten te waarborgen, zou het nuttig zijn om een betrouwbaarheidstest te ontwikkelen die op elke hoofdvorm kan worden toegepast.

Bij de herontwikkeling van dergelijke betrouwbaarheidstesten kan er gekeken worden naar de herstructurering van de startcondities. In dit onderzoek werd de ondersteuning handmatig omhoog verplaatst en losgelaten vanaf de hoogte die was aangegeven met een stuk tape. Het is belangrijk op te merken dat variaties in de startcondities en de bevestiging van de hoofdvorm aan de ondersteuning een aanzienlijke invloed hebben op het valtraject en kunnen leiden tot variaties in de resultaten.

Het wordt aanbevolen om op zoek te gaan naar een meer geschikte IMU die in staat is om de impactversnellingen nauwkeuriger te meten. Dit kan worden bereikt door verder onderzoek te doen naar het geschatte bereik van de versnellingen waarin we geïnteresseerd zijn. Het is raadzaam om te kijken naar IMU's met een groter bereik, zoals de ADIS16470 van Analog Devices die een bereik heeft van $\pm 40g$ (*ADIS16470 Datasheet and Product Info* | Analog Devices, n.d.). Een alternatieve benadering is het gebruik van een hogere samplefrequentie, zodat er voldoende meetpunten beschikbaar zijn om de piekwaarde te interpoleren en daarmee de impactversnelling beter te schatten.

Na het vaststellen van de impactversnellingen is het zinvol om te onderzoeken hoe deze gerelateerd zijn aan het potentiële risico op hoofdletsel als gevolg van een impact, bijvoorbeeld door het gebruik van een uitkomstmaat zoals de HIC. Tabel 5 toont de correlatie tussen de HIC en de Abbreviated Injury Scale (AIS), een maatstaf die de ernst van hoofdletsel aangeeft op een schaal van 1 tot 6. Hoe hoger de HIC, hoe hoger de AIS-score en hoe ernstiger het hoofdletsel zal zijn.

Om een nog completer beeld te krijgen van de impact op het hoofd bij vallen, wordt aanbevolen om niet alleen naar de impactversnelling te kijken, maar ook naar de hoekversnelling van het hoofd ten opzichte van het lichaam. Dit kan worden bereikt door de ontwikkeling van een geavanceerde

hoofdvorm die is bevestigd aan een nagebootst lichaam met een nek, zoals een crashtestdummy. Deze benadering zou de detectie van hoekversnellingen tijdens een impact mogelijk maken en de nauwkeurigheid van de impactbeoordeling verbeteren in vergelijking met de huidige bevestiging van de valhelm aan een afzonderlijke hoofdvorm.

Daarnaast kunnen in de toekomst Finite Element Head Models (FEHM), die de intracraniale druk kunnen bepalen, worden gebruikt om de impact van het hoofd te simuleren. Het gebruik van dergelijke modellen zou een accurater beeld kunnen geven van de effecten van impacts op het hoofd bij vallen als gevolg van epilepsie.

Verder is ook aan te raden om in toekomstige onderzoeken meerdere valhelmen te testen met dezelfde meetopstelling. Door de valhelmen onderling te vergelijken met behulp van een statistische toets zoals de T-toets (bij twee helmen) en ANOVA (bij meerdere helmen), kan de variatie tussen de geproduceerde valhelmen worden beoordeeld. Aangezien elke valhelm uniek is, kan een dergelijk overzicht helpen bij het beoordelen van de effectiviteit van valhelmen als geheel. Voorafgaand aan deze onderzoeken wordt ten eerste aanbevolen om een aantal testvallen uit te voeren om te verifiëren of de gemeten eindsnelheden overeenkomen met de gemiddelde waarden van dit onderzoek. Dit verificatieproces zorgt voor de betrouwbaarheid en consistentie van de meetopstelling.

Naast de zelf ontwikkelde meetopstelling zijn er professionele meetopstellingen op de markt die ook worden gebruikt voor impacttesten. Om de gebruikte meetopstelling in dit onderzoek te valideren, kunnen bijvoorbeeld fietshelmen worden getest die al zijn onderzocht met bestaande meetopstellingen.

Tabel 5: HIC correlatie met AIS en bijbehorende hoofdbeschadiging

HIC	AIS	Head injury
135 - 519	1	Headache or dizziness
520 - 899	2	Unconscious less than 1 h; linear fracture
900 - 1254	3	Unconscious 1 – 6 h; depressed fracture
1255 - 1574	4	Unconscious 6 – 24 h; open fracture
1575 - 1859	5	Unconscious more than 24 h; large hematoma
>1860	6	Non-survivable

Opmerking. Overgenomen uit On estimation of occupant safety in vehicular crashes into roadside obstacles using nonlinear dynamic analysis door Wilde et al. (2019) Copyright 2019, Wilde et al. (<https://doi.org/10.1051/mateconf/201928500022>)

Door de gemeten data van beide meetopstellingen te vergelijken voor dezelfde helm, kan de zelf ontwikkelde meetopstelling worden gevalideerd. Voor de validatie kunnen meetopstellingen van AD Engineering worden gebruikt, zoals de 'Twin wires shock absorption test equipment', die worden beschouwd als de gouden standaard in de industrie (*Products - AD Engineering*, n.d.).

Voordat nieuwe valhelmen daadwerkelijk in productie worden genomen, is verder onderzoek naar de huidige helm met de nieuwe meetopstelling noodzakelijk. De verzamelde data van de huidige valhelmen zullen de basis vormen voor de ontwikkeling en onderzoek van de nieuwe valhelmen.

5. Conclusie

In dit onderzoek is de betrouwbaarheid van de eerder ontwikkelde meetopstelling en hoofdvorm voor het beoordelen van valhelmen geëvalueerd. De resultaten tonen aan dat de meetopstelling, inclusief de hoofdvorm, niet betrouwbaar is. Herhaald gebruik onder dezelfde condities leidt niet tot consistente resultaten, zowel voor de valopstelling op zichzelf als met de hoofdvorm. Dit geeft aan dat er verbeteringen nodig zijn in zowel de valopstelling als de hoofdvorm, of in de toegepaste betrouwbaarheidstesten. Dit is een belangrijk aandachtspunt voor toekomstig onderzoek en ontwikkeling.

De positionering van de hoofdvorm op de ondersteuning heeft duidelijk effect gehad op de betrouwbaarheidsmetingen. Bij bepaalde posities werden hogere eindsnelheden gemeten, wat impliceert dat de positionering een belangrijke factor is om rekening mee te houden bij het beoordelen van valhelmen. Dit inzicht kan bijdragen aan het optimaliseren van de (toekomstige) valhelmen en het waarborgen van de veiligheid van epilepsiepatiënten.

Al deze bevindingen dragen bij aan het streven naar verbeterde veiligheid en bescherming van epilepsiepatiënten. Zodra er een duidelijk overzicht is gecreëerd van de effectiviteit van de valhelmen, kunnen de verzamelde gegevens worden gebruikt voor de ontwikkeling, productie en onderzoek naar nieuwe valhelmmodellen. Dit onderzoek draagt bij aan het bieden van verbeterde bescherming aan epilepsiepatiënten en legt de basis voor verdere ontwikkeling en innovatie op dit gebied.

Literatuurlijst

1. Abderezaei, J., Rezayaraghi, F., Kain, B., Menichetti, A. & Kurt, M. (2021b). An Overview of the Effectiveness of Bicycle Helmet Designs in Impact Testing. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.718407>
2. ADIS16470 Datasheet and Product Info | Analog Devices. (n.d.). <https://www.analog.com/en/products/adis16470.html#product-overview>
3. Asadi-Pooya, A. A., Nikseresht, A., Yaghoubi, E., & Nei, M. (2012). Physical injuries in patients with epilepsy and their associated risk factors. *Seizure*, 21(3), 165–168. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2011.10.009>
4. Baumgartner, D., Willinger, R., Shewchenko, N., & Beusenbergh, M. C. (2001). Tolerance limits for mild traumatic brain injury derived from numerical head impact replication. <http://www.ircobi.org/wordpress/downloads/irc0111/2001/Session6/6.7.pdf>
5. Bicycle Helmet Safety Institute. (z.d.). *Helmet Standards Summary*. Helmets. Geraadpleegd op 5 december 2022, van <https://helmets.org/stdsummary.htm>
6. Cachau-Hansgardh, A., McCleery, C., Limousis-Gayda M., & Hashish, R. (2021, 17 december). Analysis of bicycle helmet damage visibility for concussion-threshold impacts. *International Biomechanics*, 8(1), 85–100. <https://doi.org/10.1080/23335432.2021.2014359>
7. Deekollu, D., Besag, F., & Aylett, S. (2005). Seizure-related injuries in a group of young people with epilepsy wearing protective helmets: Incidence, types and circumstances. *Seizure*, 14(5), 347–353. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2005.04.008>
8. *Epilepsie - UMC Utrecht*. (n.d.). <https://www.umcutrecht.nl/nl/ziekte/epilepsie>
9. Gadd, C. W. (1966). Use of a Weighted-Impulse Criterion for Estimating Injury Hazard. *SAE Technical Paper Series*. <https://doi.org/10.4271/660793>
10. Greenwald, R. M., Gwin, J. T., Chu, J. J., & Crisco, J. J. (2008). HEAD IMPACT SEVERITY MEASURES FOR EVALUATING MILD TRAUMATIC BRAIN INJURY RISK EXPOSURE. *Neurosurgery*, 62(4), 789–798. <https://doi.org/10.1227/01.neu.0000318162.67472.ad>
11. Kimpara, H. & Iwamoto, M. (2011). Mild Traumatic Brain Injury Predictors Based on Angular Accelerations During Impacts. *Annals of Biomedical Engineering*, 40(1), 114–126. <https://doi.org/10.1007/s10439-011-0414-2>
12. Kleiven, S. (2007). Predictors for Traumatic Brain Injuries Evaluated through Accident Reconstructions. *SAE Technical Paper Series*. <https://doi.org/10.4271/2007-22-0003>
13. Koo, T. K., & Li, M. Y. (2016). A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *Journal of Chiropractic Medicine*, 15(2), 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>

14. Marjoux, D., Baumgartner, D., Deck, C., & Willinger, R. (2008, mei). Head injury prediction capability of the HIC, HIP, SIMon and ULP criteria. *Accident Analysis & Prevention*, 40(3), 1135–1148.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2007.12.006>
15. Mollaoğlu M, Bolayir E. Injuries in Patients with Epilepsy and Some Factors Associated with Injury. *Noro Psikiyatr Ars*. 2013 Sep;50(3):269-273. doi: 10.4274/npa.y6632. Epub 2013 Sep 1.
16. Namjoshi, D. R., Good, C., Cheng, W. H., Panenka, W., Richards, D., Cripton, P. A., & Wellington, C. L. (2013). Towards clinical management of traumatic brain injury: a review of models and mechanisms from a biomechanical perspective. *Disease Models & Mechanisms*.
<https://doi.org/10.1242/dmm.011320>
17. Newman, J. A. & Shewchenko, N., & E. Welbourne (2000). A Proposed New Biomechanical Head Injury Assessment Function - the Maximum Power Index. *SAE Technical Paper Series*.
<https://doi.org/10.4271/2000-01-sc16>
18. NGIMU – x-io Technologies. (n.d.). <https://x-io.co.uk/ngimu/>
19. Piret, ACV. (2022). Ontwikkelrapport Valhelmen Epilepsie [Stage OIM Orthopedie], De Haagse Hogeschool
20. *Products • AD Engineering*. (n.d.-b). <http://www.adengin.it/en/products/>
21. Rowson, S., Duma, S. M., Beckwith, J. G., Chu, J. J., Greenwald, R. M., Crisco, J. J., Brolinson, P. G., Duhaime, A. C., McAllister, T. W., & Maerlender, A. C. (2011). Rotational Head Kinematics in Football Impacts: An Injury Risk Function for Concussion. *Annals of Biomedical Engineering*, 40(1), 1–13.
<https://doi.org/10.1007/s10439-011-0392-4>
22. Rowson, S., & Duma, S. M. (2011). Development of the STAR Evaluation System for Football Helmets: Integrating Player Head Impact Exposure and Risk of Concussion. *Annals of Biomedical Engineering*, 39(8), 2130–2140. <https://doi.org/10.1007/s10439-011-0322-5>
23. Rowson, S., & Duma, S. M. (2013). Brain Injury Prediction: Assessing the Combined Probability of Concussion Using Linear and Rotational Head Acceleration. *Annals of Biomedical Engineering*, 41(5), 873–882. <https://doi.org/10.1007/s10439-012-0731-0>
24. Takhounts, E. G., Craig, M. J., Moorhouse, K., McFadden, J., & Hasija, V. (2013). Development of Brain Injury Criteria (BrIC). *SAE Technical Paper Series*. <https://doi.org/10.4271/2013-22-0010>
25. Takhounts, E. G., Ridella, S. A., Hasija, V., Tannous, R. E., Campbell, J. Q., Malone, D., Danelson, K. A., Stitzel, J. D., Rowson, S., & Duma, S. M. (2008). Investigation of Traumatic Brain Injuries Using the Next Generation of Simulated Injury Monitor (SIMon) Finite Element Head Model. *SAE Technical Paper Series*.
<https://doi.org/10.4271/2008-22-0001>
26. The DOME. (2017, August 30). *Overzicht normen*. DOME. <https://www.helmetfacts.com/standards/snell-b-95/>

27. Wilde, K., Tilsen, A., Burzyński, S., & Witkowski, W. (2019). On estimation of occupant safety in vehicular crashes into roadside obstacles using non-linear dynamic analysis. *MATEC Web of Conferences*, 285, 00022. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928500022>
28. Zhang, L., Yang, K. H., & King, A. I. (2004). A Proposed Injury Threshold for Mild Traumatic Brain Injury. *Journal of Biomechanical Engineering*, 126(2), 226–236. <https://doi.org/10.1115/1.1691446>

Bijlage 1: Overzicht Normen

Tabel 6: overzicht normen helmen

Benodigheden	ASTM (American national standards Institute)	CPSC (Consumer product safety commission)	CEN European (EN 1078)	Snell B95	Snell N94
Scope van de norm	Beschermende hoofddekseis, gebruikt bij het fietsen	Veiligheidsnorm voor fietshelmen	Helmen voor gebruikers van fietsen, skateboards en rolschaatsen	Beschermende hoofddekseis voor fietsgebruik	Helmen voor fietsgebruik, rolschaatsen, skateboards, peddelen, speelplaats activiteiten en andere niet- gemotoriseerde activiteiten waarbij snelheid, balans en behendigheid betrokken zijn
Vlak contactpunt	Diameter: 125mm Dikte: 25mm	Geen specificaties	Diameter: 127-133mm	Diameter: ≥ 127 mm	Diameter: ≥ 127 mm
Hoekig contactpunt	Straal: 47-49 mm	Straal: 47-49mm	Geen specificaties	Straal: 47.5-48.5mm	Straal: 47.5-48.5mm
Trottoir contactpunt (bol)	Hoek: 105 graden Straal: 14.5-15.5mm	Geen specificaties	Hoek: 105 graden Straal: 14.5-15.5mm Hoogte ≥ 50 mm Lengte ≥ 125 mm	Hoek: 105 graden Straal: 14.5-15.5mm Hoogte ≥ 50 mm Lengte ≥ 200 mm	Hoek: 105 graden Straal: 14.5-15.5mm Hoogte ≥ 50 mm Lengte ≥ 200 mm
Maximale grenswaarde versnelling (Peak acceleration threshold) (g)	300	300	250	300	300
Valhoogte vlak contactvlak (Drop Height flat anvil) (m)	2.0m/98J	2.0m/98J	1.5m/73.5J	2.0m/110J	2.0m/110J
Valhoogte hoekig contactvlak (Drop Height hemi anvil) (m)	1.2/78.5J	1.2/58J	Niet vereist	1.3/72J	1.3/72J
Valhoogte contactpunt bolling (Drop height curbstone anvil) (m)	1.2/78.5J	1.2/58J	1.5/53.9J	1.3/72J	1.3/72J

Valsysteem Drop system	Begeleide vrije val met behulp van draad, monorail of een andere drop rig	Begeleide vrije val met behulp van dubbel draad of monorail.	Dubbeldraads geleidingssysteem met een vierkant "steun dolly" frame met vier lagers die de hoofdvorm ondersteunt	Vrije val geleid door twee of meer draden/één of meer rails.	Vrije val geleid door twee of meer draden/één of meer rails.
Massa valsysteem base Weight anvil base	135kg	135kg	500kg	135kg	135kg
Massa vallend onderdeel Weight drop system	3.1-6.1 kg	5 kg +/- 0.1 kg	-	5-6.5kg	5-6.5kg
Hoofdvormen	ASTM F2220, 5 maten, magnesium K1A materiaal	ISO-DIS 6220-1983, 5 maten, K-1A magnesium legering, 5 kg inclusief ondersteunende samenstelling	Overeenstemmend met EN960, 5 maten, metaal, 3.1-6.1 kg	ISO-DIS 6220-1983, 4 maten, rigide, laag- resonantie materiaal	ISO-DIS 6220-1983, 4 maten, rigide, lag-resonantie materiaal
Totaal aantal impacts	4	20	20	4	4
versnellingsmeter	Uniaxiale versnellingsmeter, 1000 g met gevoelige as uitgelijnd binnen 5 graden van verticaal	Uniaxiale versnellingsmeter, 1000 g met gevoelige as uitgelijnd binnen 5 graden verticaal	Tri-axiale versnellingsmeter (<50 gram), bestand tegen 2000 g	Uniaxiale versnellingsmeter, 1000 g met gevoelige as uitgelijnd binnen 5 graden verticaal	Uniaxiale versnellingsmeter, 1000 g met gevoelige as uitgelijnd binnen 5 graden verticaal
Band trekkracht (Joules) hoofdvorm	24	24	-	24	24
Rolloff test	Ja	Ja	-	Ja	Ja

Opmerking. Overgenomen uit Bicycle Helmet Safety Institute (<https://helmets.org/index.htm>)

Opmerking. Overgenomen uit *helmetfacts.com* (standards/snell-p-95) door The Dome, 2017.

Bijlage 2: Hoofdbeschadiging Criteria

Tabel 7: Uitkomstmaten hoofdbeschadiging

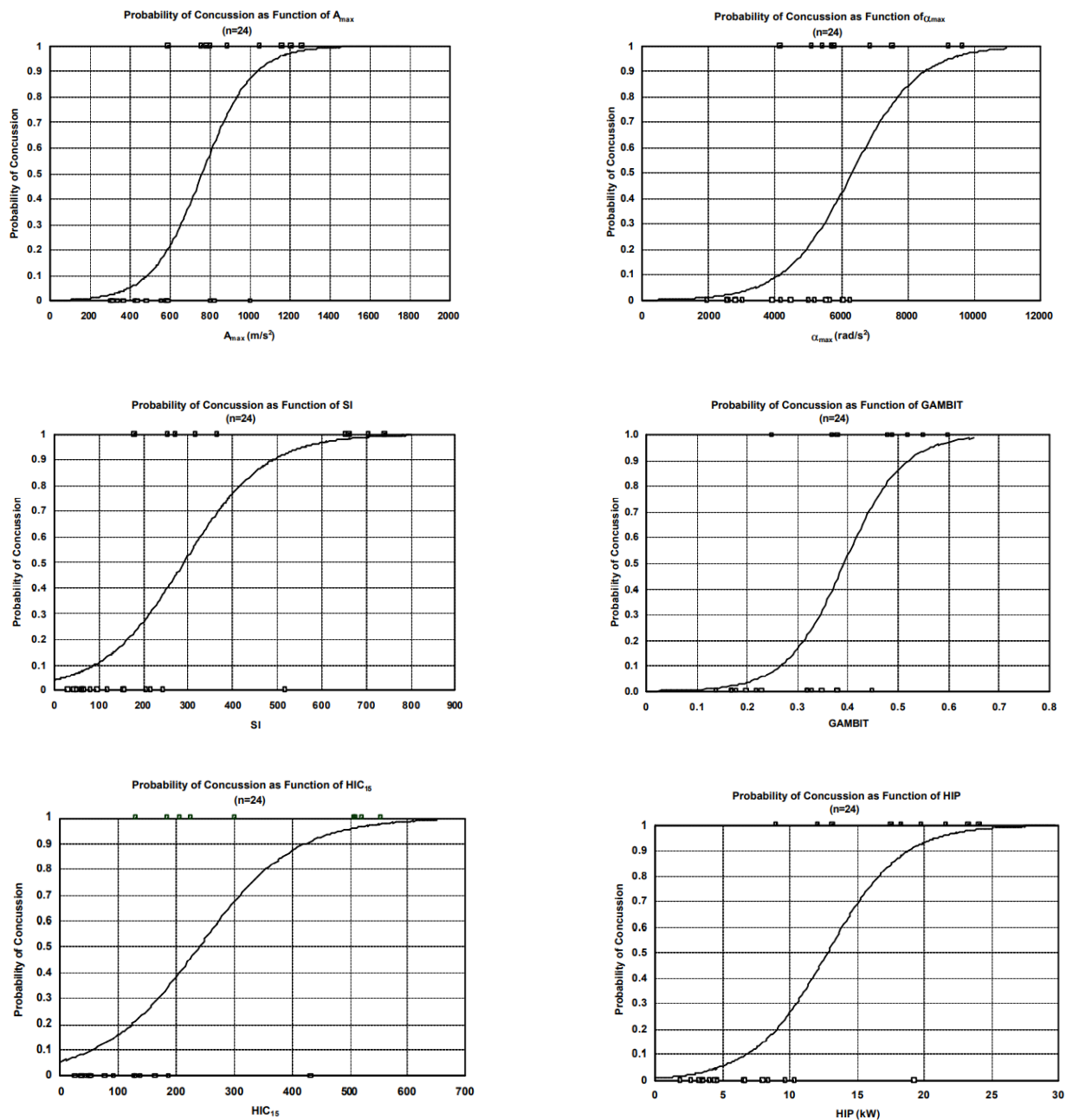
Uitkomstmaat	Onafhankelijk gemeten vrijheidsgraden (DOF)	Formule / werking	Beschrijving tekens	Bron
3 DOF kinematische translatie				
Maximale lineaire versnelling (a_{peak})	3	$a_{peak} = \max(a)$	- a (g's)	
Severity Index (SI)	3	$SI = \int A n dt = T A n \leq 1,000$	- A: lineaire versnelling - T: tijdsduur - n: wegingsfactor	Gadd, 1966
Head Injury Criterion (HIC_{15}/HIC_{36}) ($\Delta t = 36 \text{ ms}/\Delta t = 15 \text{ ms}$)	3	$HIC = \max \left\{ \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \right\}$	- a: resulterende versnelling - T1 en t2 = tijdstippen waarover HIC wordt berekend. De tijdstippen worden geselecteerd om HIC te maximaliseren. Het interval van wordt bij de HIC aangegeven: HIC_{15} (meest gebruikte) en HIC_{36} , waarbij de getallen staan voor de aantal milliseconden waarover HIC is berekend. - Macht 2.5 is gevormd vanuit onderzoek.	Kimpara & Iwamoto, 2011
3 DOF kinematische rotatie				
Maximale hoekversnelling (α_{peak})	3	$\alpha_{peak} = \max(\alpha)$	- α_{peak} : rad/s ²	
Rotational Injury Criterion (RIC)	3	$RIC = \max \left\{ \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \alpha dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \right\}$	- $\alpha(t)$: resulterende hoekversnelling - t1 en t2 zijn de tijdstippen waarover RIC wordt berekend. De tijdstippen worden geselecteerd om RIC te maximaliseren	Kimpara & Iwamoto, 2011
Maximale verandering hoeksnelheid ($\Delta \omega_{peak}$)	3	$\max(\omega_{i+1} - \omega_i)$	- $\omega = \text{rad/s}$	
Brain Injury Criterion (BrIC)	3	$BrIC = \frac{\vec{\omega}_{peaks}}{\vec{\omega}_{cr}}$	- $\vec{\omega}_{peaks}$ = maximale hoeksnelheden ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$ (rad/s))	Takhounts et al., 2013

			<ul style="list-style-type: none"> - $\vec{\omega}_{cr} = [\omega_{cr,x}, \omega_{cr,y} \text{ en } \omega_{cr,z}] = [66.2, 59.1, 44.2] \text{ rad/s}$ = kritische hoeksnelheden in hun respectieve directies 	
Power Rotational Head Injury Criterion (PRHIC)	3	$PRHIC = \max \left\{ \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} HIP_{rot} dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \right\}$	<ul style="list-style-type: none"> - t1 en t2 = tijdstippen waarover RIC wordt berekend. De tijdstippen worden geselecteerd om RIC te maximaliseren - HIP_rot = rotatie component (hoekversnelling) van de Head Impact Power (HIP) 	Takhounts et al., 2013
6 DOF translatie en rotatie				
Head Impact Power (HIP) (kW)	6	$HIP = C_1 a_x \int a_x dt + C_2 a_y \int a_y dt + C_3 a_z \int a_z dt + C_4 \alpha_x \int \alpha_x dt + C_5 \alpha_y \int \alpha_y dt + C_6 \alpha_z \int \alpha_z dt$	<ul style="list-style-type: none"> - ax, ay en az = lineaire versnellingen - α_x, α_y en α_z = hoekversnellingen - C1, C2 en C3 = massa hoofd (C1 = C2 = C3 = 4,5kg) - C4, C5 en C6 = traagheidsmomenten hoofd (C4 = 0.016 N m s⁻², C5 = 0.024 N m s⁻² en C6 = 0.022 N m s⁻²) 	Newman & Shewchenko, 2000
Generalized Acceleration Model for Brain Injury Threshold (GAMBIT)	6	$G = \max \left(\left[\left(\frac{a(t)}{a_c} \right)^n + \left(\frac{\alpha(t)}{\alpha_c} \right)^m \right]^{1/s} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> - a(t): lineaire versnelling - $\alpha(t)$: hoekversnelling - ac en α_c zijn grenswaarden. Ac = 250 g, $\alpha_c = 25000 \text{ rad/s}^2$ - n=m=s=2 	Newman & Shewchenko, 2000
Principal component score (PCS)	6	$PCS = 10 \cdot ((0.4718 \cdot sGSI + 0.4742 \cdot sHIC + 0.4336 \cdot sLIN + 0.2164 \cdot sROT) + 2)$	<ul style="list-style-type: none"> - sX = (X-mean(X)) / (SD(X)) - GSI = Gadd Severity Index - HIC = Head Impact Criteria - LIN = Linear acceleration - ROT = rotational acceleration - offset van 2 en schaling van 10 genereert PCS groter dan 0 en in de numerieke range van andere studies. 	Greenwald et al., 2008
Kleiven's linear combination	6	$KLC = 0.004718 \cdot \omega_r + 0.000224 \cdot HIC_{36}$	<ul style="list-style-type: none"> - ω_r = maximum resulterende hoeksnelheid - HIC_{36} = HIC met bepaald over 36 ms van de impact 	Kleiven, 2007

6DOF translatie en rotatie brain FE criteria				
Principal strain (corpus callosum en whole brain) $(\epsilon_{\text{peak,CC}})(\epsilon_{\text{peak}})$	6		Bepaald met Infinite Brain Models.	Kleiven, 2007
Cumulative Strain Damage Measure (CSDM₁₅ en CSDM₂₅)	6		Bepaald met Infinite Brain Models. 15 en 25 staat voor het percentage trekbelasting van de cumulatieve volumefractie van de hersenen of meer overschrijdt.	Takhounts et al., 2008
Minimale druk (P_{min})	6	$P_{\text{min}} = \min(F/A)$	<ul style="list-style-type: none"> - $F(\text{N})$ = kracht - $A(\text{mm}^3)$ = oppervlak - $P_{\text{min}} (\text{Pa})$ 	
Maximale druk (P_{max})	6	$P_{\text{max}} = \max(F/A)$	<ul style="list-style-type: none"> - $F(\text{N})$ = kracht - $A(\text{mm}^3)$ = oppervlak - $P_{\text{max}} (\text{Pa})$ 	
Von Miss Stress (kPa)	6	$N = \sigma_y * \sigma'$	<ul style="list-style-type: none"> - N = safety factor - σ_y = vloeigrens - σ' = Von Miss Stress ($\text{N/m}^2=\text{kPa}$) 	Baumgartner et al., 2001

Bijlage 3: Hersenschudding risico voor verschillende hoofdbeschadiging criteria

In onderstaand figuur worden risicocurves weergegeven die de kans op een hersenschudding illustreren voor zes verschillende parameters: A_{max} , α_{max} , HIP, SI, HIC en GAMBIT. De parameter A_{max} vertegenwoordigt de maximale lineaire versnelling van het hoofd (m/s^2), de parameter α_{max} verwijst naar de maximale hoekversnelling van het hoofd (rad/s^2). HIP staat voor de Head Impact Power (kW). De parameters SI (Severity Index), HIC (Head Injury Criterion) en GAMBIT (Generalized Acceleration Model for Brain Injury Threshold) zijn dimensieloos. Een hogere numerieke waarde van deze parameters duidt op een grotere kans op hoofdbeschadiging.



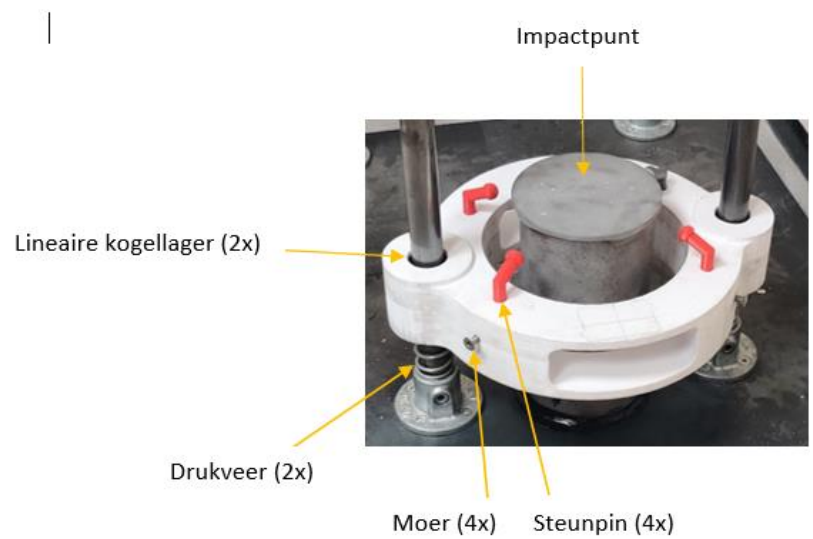
Figuur 17: Risicocurves MTBI met uitkomstmaten

Opmerking. Overgenomen uit *A Proposed New Biomechanical Head Injury Assessment Function – the Maximum Power Index* door Newman et al., (2000). Copyright 2000, The Stapp Association (<https://doi.org/10.4271/2000-01-sc16>)

Bijlage 4: Meetopstelling



Figuur 18: Meetopstelling Valhelm



Bijlage 5: Ontwikkeling Hoofdvorm

Gedurende dit onderzoek is het ontwikkelproces van de hoofdvorm voortgezet en is er veel aandacht besteed aan het optimaliseren van de hoofdvorm.

Voordat de productie kon beginnen, moest het hoofd worden gescand met een 3D-scanner, de Structure Sensor Pro. Met behulp van het programma Meshmixer werden de benodigde aanpassingen aan het hoofdmodel gedaan, zoals bijsnijden en afvlakken. Vervolgens kon het bewerkte XML-bestand worden geprint met behulp van de Creality 3D CR 10 Max 3D-printer. Het resultaat was een holle en fragiele hoofdvorm.

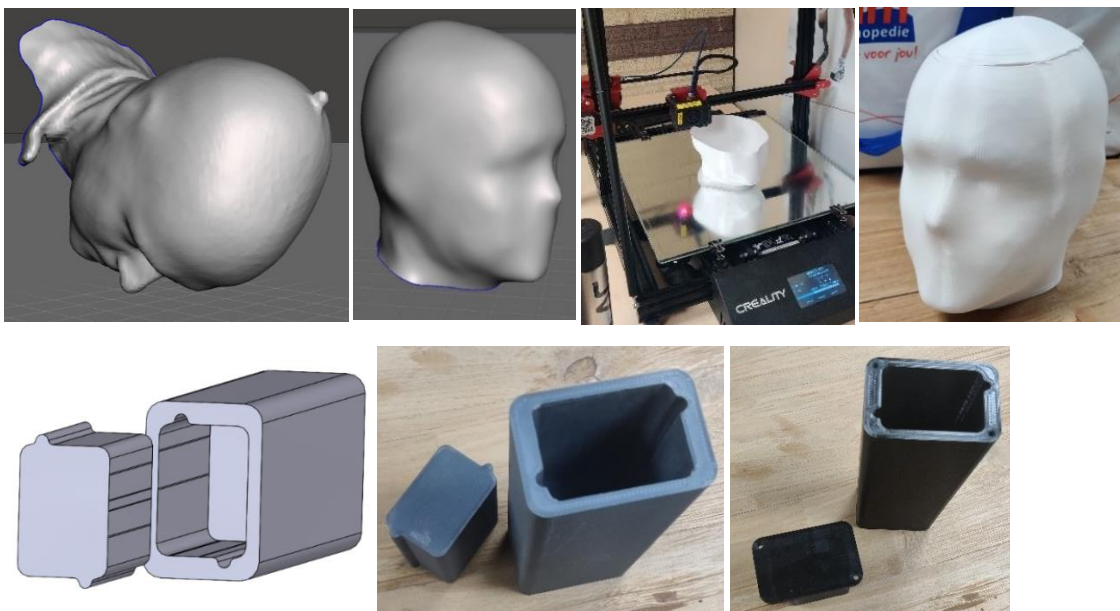
Om de hoofdvorm te verstevigen en de gewenste massa te verkrijgen, werd deze gevuld met gips. Voordat het gips volledig werd gegoten, werd de 3D-geprinte uitsparing in de hoofdvorm geplaatst, zodat deze stevig in het midden van de hoofdvorm vast kwam te zitten.

Tijdens het droogproces bleek echter dat de hoofdvorm te zwaar was voor de meetopstelling, met een massa van 5.2 kg. Normaal gesproken worden vergelijkbare massa's gebruikt bij metalen hoofdvormen in de normen (Bicycle Helmet Standards Comparison, nd.). Er werd gezocht naar een manier om massa te verliezen, bijvoorbeeld door de hoofdvorm te vullen met een lichter materiaal zoals tweecomponenten schuim of door het gips vooraf te mengen met vermiculiet. Een deel van de onderkant van de hoofdvorm werd afgezaagd om gewicht te besparen. Hierbij werd een groot deel van de uitsparing blootgelegd, dat vervolgens beschermd kon worden met licht schuim. Na alle aanpassingen woog de hoofdvorm 3.6 kg en was hij geschikt voor het onderzoek.

Echter bleek al snel dat de van gips gemaakte hoofdvorm niet geschikt was. Het gips aan het contactoppervlak verpulverde tijdens de eerste metingen. De uitsparing voor de IMU werd uit de beschadigde hoofdvorm gehaald om hergebruikt te worden voor de definitieve hoofdvorm.

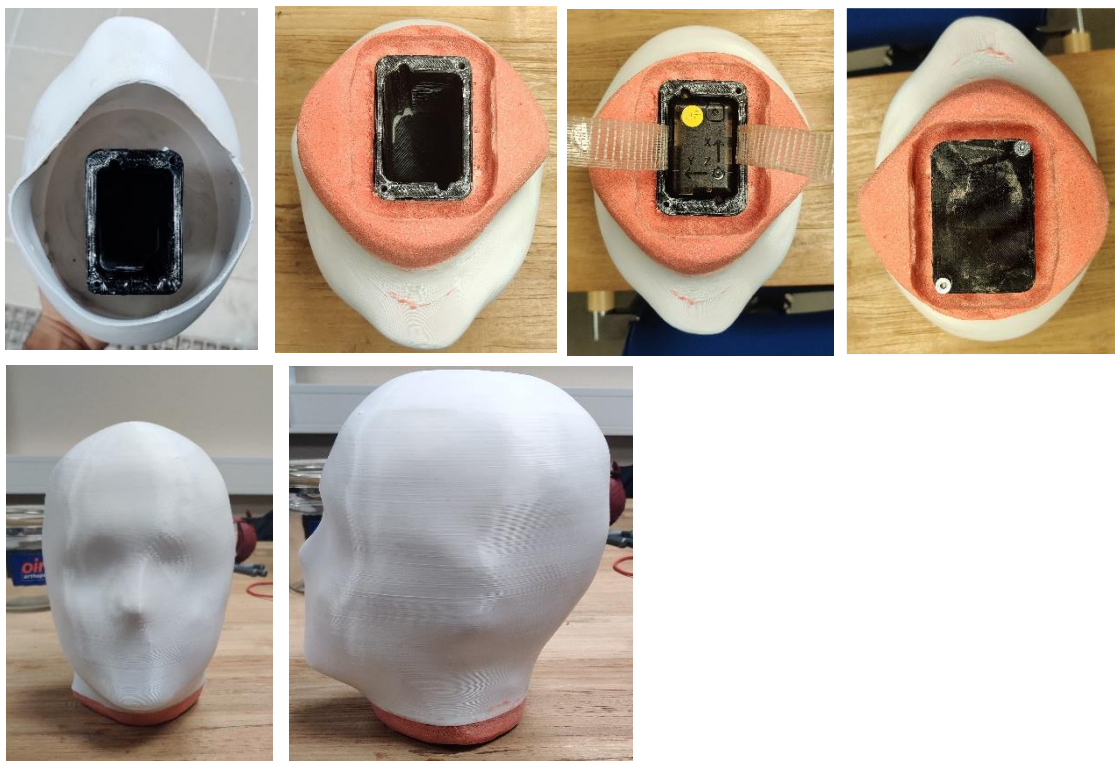
De definitieve hoofdvorm werd gemaakt door het hoofdmodel opnieuw 3D te printen en vervolgens de onderste laag (3-5 cm) met gips te vullen. De rest van de hoofdvorm werd gevuld met tweecomponenten schuim, dat werd gekozen vanwege zijn massa en sterkte. Deze combinatie van gips en schuim resulteerde in een geschikte hoofdvorm met een massa van 1.662kg, die in staat was om de impact van de vallen tijdens het onderzoek goed op te vangen.

Tijdens het onderzoek kon door de vele vallen een deel van het gips afbrokkelen. Dankzij het losse bovenste deel van het 3D-geprinte model konden deze beschadigde stukken gemakkelijk worden vervangen door het beschadigde deel van de hoofdvorm opnieuw te gipsen. Hierbij moest wel rekening worden gehouden met het droogproces van 24 uur, zodat de massa constant bleef bij de hervorming van de hoofdvorm.





Figuur 19: a) conceptfase, (b) ontwerp uitsparing, (c) 3D scan hoofd onderzoeker, d) afgevlakt hoofdmodel, e), f) 3D printen hoofdvorm, g) uitsparing(testmode), h) uitsparing (eindproduct), i) IMU plaatsing hoofd, j) sluiten uitsparing (vastschroeven), k) j) afzagen deel hoofdvorm met gips en uitsparing beschermen met schuim, m),n) Beschadiging hoofdvorm na enkele testvallen



Figuur 20: Eindproduct hoofdvorm; a) kleine laag vullen met gips, b,c,d) vulling met 2componentenschuim, e),f) definitieve hoofdvorm

Bijlage 6: Meetprotocol Betrouwbaarheid Meetopstelling

Benodigdheden:

- Meetopstelling
- IMU met bijbehorende router
- meetlint
- Tape
- Laptop met het NGIMU GUI programma
- Smeerolie/vet



Stappenplan:

1. Controleer of alle benodigdheden aanwezig zijn op de testlocatie.
2. Meet de hoogte van 2 meter vanaf het impactpunt.
3. Markeer de hoogte van 2 meter met een stuk tape rondom de palen om te voorkomen dat de ondersteuning verder kan komen.
4. Bevestig de IMU stevig met tape direct op de ondersteuning, zoals weergegeven in Figuur 13, waarbij de aan/uit knop van de IMU vrijgelaten wordt.
5. Koppel de router aan de laptop en selecteer het wifi-adres 'NGIMU' om draadloze metingen met de IMU uit te voeren.
6. Start het programma NGIMU GUI op.
7. Druk op de aan/uit knop van de IMU.
8. Ga naar *Connection > Search for Connections* of druk op F3 om te zoeken naar de IMU.
9. Selecteer de gebruikte IMU (controleer of er live data wordt weergegeven op het terminal scherm).
10. Ga naar *Graphs > Accelerometer* om de grafieken van de lineaire versnellingen te bekijken.
11. Controleer of de versnellingen correct worden weergegeven op het scherm door de ondersteuning langs de palen te bewegen.
12. Controleer of de IMU stevig op zijn plek op de ondersteuning blijft tijdens de val.
13. Start de meting van de IMU via de laptop (*Tools > Data Logger*).
14. Til de ondersteuning met de IMU 2 meter omhoog totdat deze het stuk tape raakt en niet verder kan.
15. Houd de ondersteuning 2 seconden stil op zijn plaats (deze stap creëert een baseline voor het begrijpen van de data en de bijbehorende grafieken).
16. Laat de ondersteuning vallen.
17. Herhaal stap 14 t/m 16 tweemaal.
18. Stop de meting via de Data Logger wanneer de ondersteuning tot stilstand is gekomen.
19. Sla de gemeten data op onder een herkenbare naam, bijvoorbeeld "meetopstelling_2m_1tm4".
20. Herhaal stappen 11 t/m 19 viermaal.
21. Controleer of er in totaal twaalf metingen zijn uitgevoerd voor de valhoogte van 2 meter.
22. Herhaal stappen 11 t/m 21 voor een valhoogte van 1,5 meter.
23. Herhaal stappen 11 t/m 17 voor een valhoogte van 1 meter.
24. Controleer of er in totaal twaalf metingen (en dus 36 vallen) zijn uitgevoerd.
25. Schakel de IMU handmatig uit.
26. Koppel de router los van de laptop en sluit het NGIMU GUI programma af.
27. Verwijder de IMU van de ondersteuning.

Bijlage 7: Meetprotocol Betrouwbaarheid Hoofdvorm

Benodigdheden:

- Meetopstelling
- Hoofdvorm
- Meetlint
- IMU met bijbehorende router
- Laptop met het NGIMU GUI programma
- Stift
- Klem/banden/tape

Stappenplan:

1. Controleer of alle benodigdheden aanwezig zijn op de testlocatie.
2. Bevestig dat het impactpunt losgekoppeld is van de onderplaat.
3. Markeer de vijf zijden van de hoofdvorm met behulp van een stift (zie Figuur ...).
4. Markeer de vijf verschillende posities van de steunpinnen op de hoofdvorm.
5. Meet de hoogte van 0.63m vanaf de onderplaat (0.13m hoogte impactpunt + 0.5m).
6. Markeer de gemeten hoogte met een stuk tape rondom de palen om te voorkomen dat de ondersteuning verder kan komen.
7. Koppel de router aan de laptop en selecteer het wifi-adres 'NGIMU' zodat de IMU draadloos metingen kan uitvoeren.
8. Start het programma NGIMU GUI op.
9. Druk op de aan/uit knop van de IMU.
10. Ga naar *Connection > Search for Connections* of druk op F3 om te zoeken naar de IMU.
11. Selecteer de gebruikte IMU (live data wordt weergegeven op het terminal scherm).
12. Plaats de IMU in de hoofdvorm met de aan/uit knop naar buiten gericht.
13. Plaats de deksel in de uitsparing en druk daarmee de IMU stevig op de bodem van de uitsparing.
14. Schroef de deksel vast om te voorkomen dat de IMU kan bewegen.
15. Ga naar *Graphs > Accelerometer* om de grafieken van de lineaire versnellingen te bekijken.
16. Controleer of de versnellingen correct worden weergegeven bij het verplaatsen van de hoofdvorm.
17. Plaats de hoofdvorm recht op de ondersteuning.
18. Bind de hoofdvorm stevig vast aan de ondersteuning om te voorkomen dat deze tijdens de vallen beweegt.
19. Controleer met een "testval" of de hoofdvorm op zijn plek blijft staan.
20. Start de meting van de IMU via de laptop (Tools > Data Logger).
21. Til de ondersteuning met de hoofdvorm omhoog totdat deze wordt tegengehouden door het stuk tape.
22. Houd het geheel 1 á 2 seconden op zijn plek om een baseline te creëren.
23. Laat de ondersteuning met hoofdvorm los.
24. Herhaal stap 21 t/m 23 tweemaal.
25. Stop de opname via de Data Logger.
26. Sla de gemeten data van de IMU op onder een herkenbare naam, bijvoorbeeld "Betrouwbaar_Hoofdvorm_Top_1tm3".
27. Herhaal stappen 19 t/m 25 driemaal.
28. Controleer of er in totaal vier metingen en twaalf vallen hebben plaatsgevonden voor elke positie van de hoofdvorm.
29. Koppel de hoofdvorm los van de ondersteuning.
30. Herhaal stappen 16 t/m 28 voor de voorkant van de hoofdvorm.

31. Herhaal stappen 16 t/m 28 voor de achterkant van de hoofdvorm.
32. Herhaal stappen 16 t/m 28 voor de rechterzijde van de hoofdvorm.
33. Herhaal stappen 16 t/m 28 voor de linkerzijde van de hoofdvorm.
34. Controleer of er in totaal twintig metingen en zestig vallen hebben plaatsgevonden.
35. Schroef de deksel los en haal de IMU uit de hoofdvorm.
36. Schakel de IMU handmatig uit.
37. Koppel de router los van de laptop en sluit het NGIMU GUI programma af.



Bijlage 8: Meetprotocol Valhelm

Benodigheden:

- Meetopstelling (inclusief 4 schuine steunpinnen en 2 rechte steunpinnen)
- Hoofdvorm
- Meetlint
- IMU
- Valhelm
- Tape
- Laptop met het NGIMU GUI programma

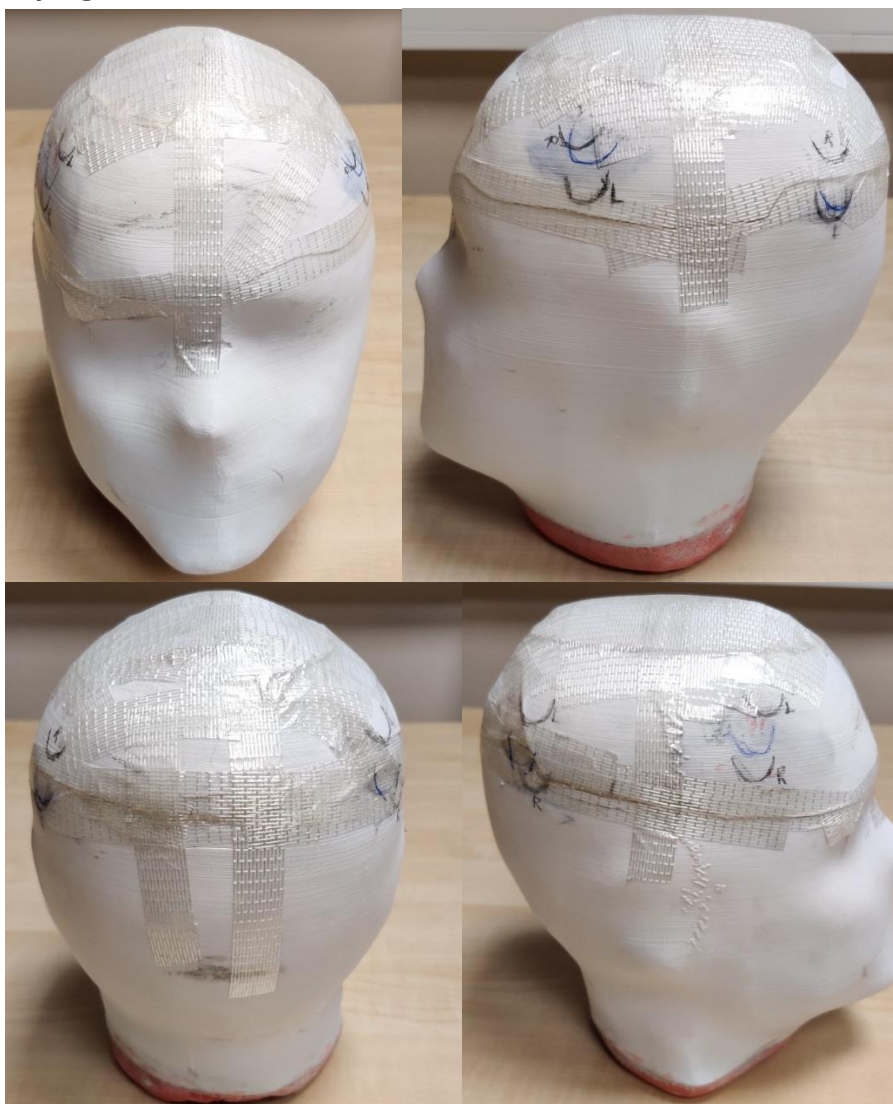
Stappenplan:

1. Controleer of alle benodigheden aanwezig zijn op de testlocatie.
2. Geef de vijf zijden van het hoofd aan met behulp van de stift.
3. Markeer de 5 verschillende posities van de steunpinnen op de hoofdvorm/valhelm (Bijlage 9).
4. Meet vanaf het impactpunt de hoogte van 0.5m.
5. Geef de hoogte van 0.5m aan met een stuk tape rondom de palen, zodat de ondersteuning niet verder kan komen dan dit punt.
6. Positioneer de vier schuine steunpinnen 4 cm in de ondersteuning en zet ze vast met behulp van de boutjes.
7. Koppel de router aan de laptop en selecteer vervolgens het wifi-adres 'NGIMU' (zo kan de IMU draadloos metingen uitvoeren).
8. Start het programma NGIMU GUI op.
9. Druk op de aan/uit knop van de IMU.
10. Ga naar *Connection > Search for Connections* of druk op *F3* om te zoeken naar de IMU
11. Selecteer de gebruikte IMU (als het goed is er nu live data te zien op het terminal scherm)
12. Plaats de IMU met de aan/uit knop naar buiten in de hoofdvorm
13. Plaats de deksel in de uitsparing en duw daarmee de IMU tot op de bodem van de uitsparing.
14. Schroef de deksel vast, zodat de IMU niet meer kan bewegen.
15. Plaats de valhelm op de hoofdvorm.
16. Ga naar *Graphs > Accelerometer* om de grafieken van de lineaire versnellingen op het scherm te zien.
17. Controleer of de versnellingen correct op het scherm worden weergegeven, bij het verplaatsen van de hoofdvorm.
18. Plaats de hoofdvorm op de ondersteuning.
19. Positioneer de hoofdvorm zo dat de top van het hoofd de val zal opvangen en contact maakt met het impactpunt.
20. Start de meting van de IMU via de laptop (*Tools > Data Logger>Start*)
21. Trek de ondersteuning met hoofdvorm 0.5m de lucht in tot de ondersteuning niet meer verder kan door het stuk tape.
22. Laat de ondersteuning met hoofdvorm langs de geleider vallen.
23. Stop de opname via de Data Logger.
24. Sla de gemeten data van de IMU op onder een herkenbare naam (vb Valhelm_Top_1).
25. Herhaal stappen 18 t/m 24 zevenmaal.
26. Controleer of er 8 vallen/metingen hebben plaatsgevonden voor desbetreffende positie van het hoofd.

27. Herhaal stappen 18 t/m 26 voor de voorkant van de hoofdvorm. Hierbij worden de achterste (schuine) steunpinnen 3cm in de ondersteuning geplaatst. De voorste steunpinnen worden volledig in de ondersteuning gedruwd en maken geen contact met de hoofdvorm.
28. Herhaal stappen 18 t/m 26 voor de achterkant van de hoofdvorm. Hierbij worden de voorste (schuine) steunpinnen 3cm in de ondersteuning geplaatst. De achterste steunpinnen worden volledig in de ondersteuning gedruwd en maken geen contact met de hoofdvorm.
29. Herhaal stappen 18 t/m 26 voor de rechter zijde van de hoofdvorm. Hierbij worden er twee schuine steunpinnen 3cm aan de linkerkant van de ondersteuning geplaatst. Voor de rechterkant worden er 2 rechte steunpinnen 5 cm in de ondersteuning geplaatst.
30. Herhaal stappen 18 t/m 26 voor de linker zijde van de hoofdvorm. Hierbij worden er twee schuine steunpinnen 3cm aan de rechterkant van de ondersteuning geplaatst. Voor de linkerkant worden er 2 rechte steunpinnen 5 cm in de ondersteuning geplaatst.
31. Controleer of er in totaal 40 vallen/metingen hebben plaatsgevonden.
32. Herhaal stappen 18 t/m 31 voor een valhoogte van 1m.
33. Controleer of er in totaal 80 vallen/metingen hebben plaatsgevonden.
34. Haal de valhelm los van de hoofdvorm.
35. Schroef de deksel van de uitsparing open en haal de IMU eruit.
36. Zet de IMU uit.
37. Koppel de router los van de laptop en sluit het NGIMU GUI programma.



Bijlage 9: Aftekenen Positie hoofdvorm en valhelm





Bijlage 10: Matlabscripts

Betrouwbaarheid Meetopstelling

```
clear all
close all

% Rij aangeven(-4) voor export Excel
valnummer = 1;

% for-loop creëren voor het aantal xml. bestanden (van de IMU) dat
% geselecteerd moet worden
for i = 1:4

%% Importeer Session.XML file
[FileName,PathName] = uigetfile('.xml', 'Selecteer Session.xml','Session.xml');
XMLFile = fullfile(PathName,FileName);

IMUdata = ImportNGIMU(XMLFile);

clearvars -except IMUdata valnummer % verwijderen onnodige variabelen, bewaren
IMUdata en valnummer

%% variabelen voor tijd, versnelling maken
disp(IMUdata.System.Name) % hoogte en nummer van val weergeven
valnaam = IMUdata.System.Name;

% gebruikte samplefrequentie voor IMU (tot max 400)
fs = IMUdata.System.SampleFrequentie.S01TRUNK.linear;
fs = str2double(fs);

% tijdsvector
t = IMUdata.S01TRUNK.linearAcceleration.Time;

% versnellingen over 3 assen (x,y,z) in g's
AccX = IMUdata.S01TRUNK.linearAcceleration.X;
AccY = IMUdata.S01TRUNK.linearAcceleration.Y;
AccZ = IMUdata.S01TRUNK.linearAcceleration.Z;
Acc = [AccX AccY AccZ];

%% for-loop voor het (handmatig) selecteren van de 3 vallen per meting
% binnen de for-loop wordt de eindsnelheid, eindversnelling,
% impactversnelling en valtijd bepaald

for j = 1:3

% plotten lineaire versnelling (x,y,z)
figure(1)
plot(Acc)
title('Lineaire versnelling')
legend('x','y','z')
xlabel('meetpunt(index)')
ylabel('versnelling(g)')

% vallen uit data knippen door het begin en einde van de val te selecteren
[begin_eind,~] = ginput(2); % 2 punten selecteren begin/einde val
index = round(begin_eind); % afronden om bestaande index te krijgen
begin = index(1); % begin val
```

```

eind = index(2); % einde val
tnieuw = t(1:(eind-begin)); % nieuwe tijdas maken voor geselecteerde stuk

% aanpassen versnellingen binnen geselecteerde 2 punten:
AccX_val = AccX(begin:(eind-1));
AccY_val = AccY(begin:(eind-1));
AccZ_val = AccZ(begin:(eind-1));

Acc_val = [AccX_val AccY_val AccZ_val];
RAcc = sqrt(AccX_val.^2+AccY_val.^2+AccZ_val.^2); % resulterende versnelling (g)
Avg_RAcc = sum(RAcc)./length(RAcc); % gemiddelde versnelling (g)

% versnellingen omzetten in m/s^2:
AccX_m = AccX_val.*9.81;
AccY_m = AccY_val.*9.81;
AccZ_m = AccZ_val.*9.81;
Acc_m = [AccX_m AccY_m AccZ_m];
RAcc_m = RAcc.*9.81; % resulterende versnelling in m/s^2

%% bepalen valtijd, eindsnelheid en versnelling tijdens impact
[valtijd,snelheid,snelheid_eind,snelheid_index,Acc_gem] = bereken_val(tnieuw,
Acc_m);
Valtijd(j,:) = valtijd;
Acc_Gem(j,:) = Acc_gem;
snelheid_Z = snelheid(:,3);
RSnelheid_eind(j,:) = snelheid_eind;
SnelheidZ_eind(j,:) = -snelheid_Z(snelheid_index);

%% aanpassen lengte matrixen om over elkaar liggende plots te creëren van
%plot voor snelheid val
begin_plot_v = snelheid_index - 80; %1m:60, 1.5m:70, 2m:85
eind_plot_v = snelheid_index + 1;
tplot_v = tnieuw(1:82);
snelheid_val(:,j) = -snelheid_Z(begin_plot_v:eind_plot_v);

end

%% plotten
% plotten snelheid tijdens val
figure(3)
hold on
plot(tplot_v,snelheid_val)
title('Snelheid val ondersteuning')
xlabel('tijd(s)')
ylabel('snelheid z-as (m/s)')

%% gegevens invullen in Excel bestand
variabelen = [Valtijd, SnelheidZ_eind, Acc_Gem];
valnummer = valnummer+3;
valnummer_str = num2str(valnummer); % string maken van valnummer
plek_tabel = ['B' valnummer_str]; % kolom en rij in Excel

% exporteren data z-as naar Excel
xlswrite('Data-overzicht
DEFINITIEF.xlsx',variabelen,'Betrouwbaarheid_Meetopstelling',plek_tabel)

end

```

Betrouwbaarheid Hoofdvorm

```
clear all
close all

valnummer1 = 1; % rij in Excel -3
valnummer2 = 18;
valnummer3 = 35;

Vx_val = zeros(43,3);
Vy_val = zeros(43,3);
Vz_val = zeros(43,3);
RV_val = zeros(43,3);

% for-loop creeëren voor het aantal xml. bestanden (van de IMU) dat
% geselecteerd moet worden
for i = 1:4

%% Importeer Session.XML file
[FileName,PathName] = uigetfile('.xml', 'Selecteer Session.xml','Session.xml');
XMLFile = fullfile(PathName,FileName);

IMUdata = ImportNGIMU(XMLFile);

%% variabelen voor tijd, versnelling maken
disp(IMUdata.System.Name) % hoogte en nummer van val weergeven
valnaam = IMUdata.System.Name;

% gebruikte samplefrequentie voor IMU (tot max 400)
fs = IMUdata.System.SampleFrequentie.S01TRUNK.linear;
fs = str2double(fs);

% tijdsvector
t = IMUdata.S01TRUNK.linearAcceleration.Time;

% versnellingen over 3 assen (x,y,z) in g's
AccX = IMUdata.S01TRUNK.linearAcceleration.X;
AccY = IMUdata.S01TRUNK.linearAcceleration.Y;
AccZ = IMUdata.S01TRUNK.linearAcceleration.Z;
Acc = [AccX AccY AccZ];

%% for loop voor het aantal te selecteren vallen per meting
for j = 1:3

% plotten lineaire versnelling (x,y,z)
figure(1)
plot(Acc)
title('Lineaire versnelling')
legend('x','y','z')
xlabel('meetpunt(index)')
ylabel('versnelling(g)')

% val uit data knippen, door beginpunt en eindpunt te selecteren in plot
[begin_eind,~] = ginput(2); % 2 punten selecteren begin/einde val
index = round(begin_eind); % afronden om bestaande index te krijgen
begin = index(1);
eind = index(2);
tnieuw = t(1:(eind-begin)); % nieuwe tijdas maken voor val

% aanpassen versnellingen binnen geselecteerde 2 punten:
```

```

AccX_val = AccX(begin:(eind-1));
AccY_val = AccY(begin:(eind-1));
AccZ_val = AccZ(begin:(eind-1));

Acc_val = [AccX_val AccY_val AccZ_val];
RAcc_val = sqrt(AccX_val.^2+AccY_val.^2+AccZ_val.^2); % resulterende
versnelling (g)
Avg_RAcc = sum(RAcc_val)./length(RAcc_val); % gemiddelde
versnelling (g)

% versnellingen omzetten in m/s^2:
g = 9.81;
AccX_m = AccX_val.*g;
AccY_m = AccY_val.*g;
AccZ_m = AccZ_val.*g;
Acc_m = [AccX_m AccY_m AccZ_m];
RAcc_m = RAcc_val.*g; % resulterende versnelling in m/s^2

%% maximale versnelling gedurende de val met bijbehorende index bepalen (negatieve
waarden)
[valtijd,snelheid,snelheid_eind,snelheid_index,Acc_gem] = bereken_val(tnieuw,
Acc_m);
Valtijd(j,:) = valtijd;
Acc_Gem(j,:) = Acc_gem;

% snelheid splitsen langs de drie assen (x,y,z)
vx_val = snelheid(:,1);
vy_val = snelheid(:,2);
vz_val = snelheid(:,3);
vr_val = sqrt(vx_val.^2+vy_val.^2+vz_val.^2); % resulterende snelheid

% snelheid einde van de val, net vóór impact
vx_eind(j,:) = vx_val(snelheid_index);
vy_eind(j,:) = vy_val(snelheid_index);
vz_eind(j,:) = vz_val(snelheid_index);
vr_eind(j,:) = snelheid_eind; % resulterende eindsnelheid val

%% aanpassen lengte matrixen om over elkaar liggende plots te creeeren
% plot voor snelheid val
begin_plot_v = snelheid_index - 40;
eind_plot_v = snelheid_index + 2;
tplot_v = tnieuw(1:43);
Vx_val(:,j) = vx_val(begin_plot_v:eind_plot_v);
Vy_val(:,j) = vy_val(begin_plot_v:eind_plot_v);
Vz_val(:,j) = vz_val(begin_plot_v:eind_plot_v);
RV_val(:,j) = vr_val(begin_plot_v:eind_plot_v);

end

%% plotten snelheden en versnellingen tijdens impact van de 8 vallen
% Snelheid val
figure(2)
subplot(2,2,1)
hold on
plot(tplot_v,Vx_val) % x-as
title('Snelheid val x-as')
xlabel('tijd(s)')
ylabel('snelheid(m/s)')

```

```

subplot(2,2,2)
hold on
plot(tplot_v,Vy_val) % y-as
title('Snelheid val y-as')
xlabel('tijd(s)')
ylabel('snelheid(m/s)')
subplot(2,2,3)
hold on
plot(tplot_v,Vz_val) % z-as
title('Snelheid val z-as')
xlabel('tijd(s)')
ylabel('snelheid(m/s)')
subplot(2,2,4)
hold on
plot(tplot_v,RV_val) % resulterende versnelling
title('Resulterende snelheid val')
xlabel('tijd(s)')
ylabel('snelheid(m/s)')

%% gegevens invullen in Excel bestand
%% % matrixen maken om een overzicht te creëren en makkelijk exporteren naar
%% % Excel
v_eind = [vx_eind vy_eind vz_eind vr_eind]; % eindsnelheid van de val

% a_eind = [ax_eind ay_eind az_eind ar_eind]; % versnelling einde van de val, vóór
impact
% a_impact = [ax_impact ay_impact az_impact ar_impact]; % versnelling tijdens
impact

% plek in Excelsheet vaststellen
valnummer1 = valnummer1+3;
valnummer2 = valnummer2+3;
valnummer3 = valnummer3+3;
valnummer_str1 = num2str(valnummer1);
valnummer_str2 = num2str(valnummer2);
valnummer_str3 = num2str(valnummer3);
plek_tabel1 = ['B' valnummer_str1]; % kolom en rij in Excel
plek_tabel2 = ['B' valnummer_str2];
plek_tabel3 = ['B' valnummer_str3];

% exporteren data z-as naar Excel
xlswrite('Data-overzicht
DEFINITIEF.xlsx',v_eind,'Betrouwbaarheid_Hoofdvorm',plek_tabel1); % exporteren
eindsnelheid
xlswrite('Data-overzicht
DEFINITIEF.xlsx',Acc_Gem,'Betrouwbaarheid_Hoofdvorm',plek_tabel2); % exporteren
gemiddelde versnelling
xlswrite('Data-overzicht
DEFINITIEF.xlsx',Valtijd,'Betrouwbaarheid_Hoofdvorm',plek_tabel3); % exporteren
valtijd

end

```

Effectiviteit valhelm

```
% In dit Matlabscript wordt de data van de vallen van de hoofdvorm met valhelm,  
% gemeten met een IMU, geïmporteerd. Hierna worden de specifieke vallen geknipt en  
% wordt voor de  
% val de HIC waarde bepaald. De maximale lineaire versnelling en de HIC  
% waarde worden vervolgens geëxporteerd naar Excel om daar een duidelijk  
% overzicht te creëren.  
% Vanuit externe partijen zijn de volgende Matlab scripts gebruikt:  
% ImportNGIMU en HIC_vectorized  
  
clear all  
close all  
  
% preallocating  
Vx_val = zeros(183,8);  
Vy_val = zeros(183,8);  
Vz_val = zeros(183,8);  
RV_val = zeros(183,8);  
  
for i = 1:8  
%% Importeer Session.XML file  
[FileName,PathName] = uigetfile('.xml', 'Selecteer Session.xml','Session.xml');  
XMLFile = fullfile(PathName,FileName);  
IMUdata = ImportNGIMU(XMLFile);  
  
%% variabelen voor tijd, versnelling en hoekversnelling maken  
disp(IMUdata.System.Name) % hoogte en nummer van val weergeven  
valnaam = IMUdata.System.Name;  
  
% gebruikte samplefrequentie voor IMU (tot max 400)  
fs = IMUdata.System.SampleFrequentie.Stuur.linear;  
fs = str2double(fs);  
  
% tijdsvector  
t = IMUdata.Stuur.linearAcceleration.Time;  
t_orientatie = IMUdata.Stuur.sensors.Time;  
  
% versnellingen over 3 assen (x,y,z) in g's  
AccX = IMUdata.Stuur.linearAcceleration.X;  
AccY = IMUdata.Stuur.linearAcceleration.Y;  
AccZ = IMUdata.Stuur.linearAcceleration.Z;  
Acc = [AccX AccY AccZ];  
RAcc = sqrt(AccX.^2+AccY.^2+AccZ.^2);  
  
% versnellingen over 3 assen gemeten door accelerometer met fs=100  
AccX_sensor = IMUdata.Stuur.sensors.Accelerometer_X;  
AccY_sensor = IMUdata.Stuur.sensors.Accelerometer_Y;  
AccZ_sensor = IMUdata.Stuur.sensors.Accelerometer_Z;  
Acc_sensor = [AccX_sensor AccY_sensor AccZ_sensor];  
  
%% Bepalen versnellingen tijdens val  
% plotten lineaire versnelling  
figure(1)  
plot(Acc)  
title('Lineaire versnelling')  
legend('x','y','z')  
xlabel('meetpunten(index)')  
ylabel('versnelling(g)')
```

```

% interval kiezen van val
[begin_eind,~] = ginput(2);      % 2 punten selecteren begin/einde val
index = round(begin_eind);      % afronden om bestaande index te krijgen
begin = index(1);
eind = index(2);
tnieuw = t(1:(eind-begin));    % nieuwe tijdas maken

% aanpassen versnellingsmatrixen voor desbetreffende interval
AccX_val = AccX(begin:(eind-1));
AccY_val = AccY(begin:(eind-1));
AccZ_val = AccZ(begin:(eind-1));

Acc_val = [AccX_val AccY_val AccZ_val];
RAcc_val = sqrt(AccX_val.^2+AccY_val.^2+AccZ_val.^2); % resulterende versnelling
Avg_RAcc = sum(RAcc_val)./length(RAcc_val);          % gemiddelde
resulterende versnelling

% versnellingen omrekenen naar m/s^2
g = 9.81;
AccX_m = AccX_val.*g;
AccY_m = AccY_val.*g;
AccZ_m = AccZ_val.*g;
Acc_m = [AccX_m AccY_m AccZ_m];
RAcc_m = RAcc_val.*g; % resulterende versnelling in m/s^2

%% maximale versnelling gedurende de val met bijbehorende index bepalen (negatieve
waarden)
[valtijd,snelheid,snelheid_eind,snelheid_index,Acc_gem] = bereken_val(tnieuw,
Acc_m);
Valtijd(i,:) = valtijd;
Acc_Gem(i,:) = Acc_gem;

% snelheid splitsen langs de drie assen (x,y,z)
vx_val = snelheid(:,1);
vy_val = snelheid(:,2);
vz_val = snelheid(:,3);
vr_val = sqrt(vx_val.^2+vy_val.^2+vz_val.^2); % resulterende snelheid

% snelheid einde van de val, net vóór impact
vx_eind(i,:) = vx_val(snelheid_index);
vy_eind(i,:) = vy_val(snelheid_index);
vz_eind(i,:) = vz_val(snelheid_index);
vr_eind(i,:) = snelheid_eind; % resulterende eindsnelheid val

%% aanpassen lengte matrixen om over elkaar liggende plots te creëren
% snelheid val
begin_plot_v = snelheid_index - 180;
eind_plot_v = snelheid_index + 2;
tplot_v = tnieuw(1:183);
Vx_val(:,i) = vx_val(begin_plot_v:eind_plot_v);
Vy_val(:,i) = vy_val(begin_plot_v:eind_plot_v);
Vz_val(:,i) = vz_val(begin_plot_v:eind_plot_v);
RV_val(:,i) = vr_val(begin_plot_v:eind_plot_v);

```



```

%% HIC berekenen
% DeltaT = 1/fs; % aantal seconden tussen elk punt van RAcc
% Win = 15; % tijd limiet (in ms)
%
% Oproepen HIC_vectorized functie
% input: Resulterende versnelling, tijdstappen en lengte waarover HIC
% berekend moet worden.
% Output: HIC-waarde, iT1(begintijdstip waarover HIC is berekend), iT2(eindpunt
% waarover HIC is berekend) en gemiddelde
% versnelling.
% [HICvalue, iT1, iT2, avgAcc] = HIC_vectorized(RAcc_val,DeltaT,Win);
% HICValue(i,:) = HICvalue;

end

%% plotten snelheden en versnellingen tijdens impact van de 8 vallen
% snelheid val
figure(2)
subplot(2,2,1)
hold on
plot(tplot_v,Vx_val) % x-as
title('Snelheid val x-as')
xlabel('tijd(s)')
ylabel('snelheid(m/s)')
subplot(2,2,2)
hold on
plot(tplot_v,Vy_val) % y-as
title('Snelheid val y-as')
xlabel('tijd(s)')
ylabel('snelheid(m/s)')
subplot(2,2,3)
hold on
plot(tplot_v,Vz_val) % z-as
title('Snelheid val z-as')
xlabel('tijd(s)')
ylabel('snelheid(m/s)')
subplot(2,2,4)
hold on
plot(tplot_v,RV_val) % resulterende snelheid
title('Resulterende snelheid val')
xlabel('tijd(s)')
ylabel('snelheid(m/s)')

% matrixen maken om een overzicht te creëren en makkelijk exporteren naar
% Excel
v_eind = [vx_eind vy_eind vz_eind vr_eind]; % eindsnelheid van de val

%% gegevens invullen in Excel bestand
% matrixen maken om een overzicht te creëren en makkelijk exporteren naar
% Excel
v_eind = [vx_eind vy_eind vz_eind vr_eind]; % eindsnelheid van de val
%
% plek in Excelsheet vaststellen
valnummer1 = 45; % rij in Excel -3
valnummer2 = 58;
valnummer3 = 71;
valnummer_str1 = num2str(valnummer1);
valnummer_str2 = num2str(valnummer2);
valnummer_str3 = num2str(valnummer3);

```

```

plek_tabel1 = ['Z' valnummer_str1]; % kolom en rij in Excel
plek_tabel2 = ['Z' valnummer_str2];
plek_tabel3 = ['Z' valnummer_str3]; %BHNTZ

% exporteren data z-as naar Excel
xlswrite('Data-overzicht DEFINITIEF.xlsx',v_eind,'Valhelm',plek_tabel1);
xlswrite('Data-overzicht DEFINITIEF.xlsx',Acc_Gem,'Valhelm',plek_tabel2);
xlswrite('Data-overzicht DEFINITIEF.xlsx',Valtijd,'Valhelm',plek_tabel3);

```

Matlabfunctie: Snelheid en valtijd

```

function [valtijd,snelheid,snelheid_eind,snelheid_index,Acc_gem] =
bereken_val(tnieuw, Acc_m)
    % versnelling: vector met versnellingsgegevens (in m/s^2)
    % t: vector met tijdstappen (in seconden)
    % valtijd: berekende valtijd (in seconden)
    % snelheid_eind: Berekende eindsnelheid, voordat de impact plaatsvindt

    % Bereken de snelheid door integratie van de versnelling
    snelheid = cumtrapz(tnieuw, Acc_m);
    snelheid_R = sqrt(snelheid(:,1).^2+snelheid(:,2).^2+snelheid(:,3).^2);
    snelheid_Z = snelheid(:,3);
    RAcc_m = sqrt(Acc_m(:,1).^2+Acc_m(:,2).^2+Acc_m(:,3).^2);

    % Zoek de index voor het begin van de val
    omkeer_index1 = find(snelheid_Z < -0.02, 1); % start van de val
    % eindsnelheid en bijbehorende index bepalen
    [max_snelheid,max_index] = findpeaks(snelheid_R,'MinPeakHeight',1); % piek
    vinden van min 2m/s
    [snelheid_eind, snelheid_index] = max(max_snelheid);
    snelheid_index = max_index(snelheid_index);

    % Bepalen gemiddelde versnelling gedurende val
    Acc_val = RAcc_m(omkeer_index1:snelheid_index);
    Acc_gem = mean(Acc_val);

    % Berekenen valtijd
    valtijd = tnieuw(snelheid_index) - tnieuw(omkeer_index1);

end

```

Matlabfunctie: HIC

```
function [HICvalue, iT1, iT2, avgAcc] = HIC_vectorized(RAcc, DeltaT, Win)
% (vectorized version of https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/528063-how-to-rid-hic-calculation-of-nested-for-loops)
% het origineel gemaakt door Michael Schlick en aangepast door Ma Ma en
% vervolgens overgenomen door Antoine Piret)
% RAcc is resulterende versnelling in "g"s (altijd positief)
% DeltaT aantal seconden tussen elk punt van RACC (1/samplefrequentie)
% Win is een tijdslimiet(ms) waar de berekeningen niet over heen mogen
% komen. In de literatuur veel '12' en '36' gebruikt.

winpts = round((Win/1000)./DeltaT); % tijdslimiet wordt omgezet in aantal
tijdstappen
pts = length(RAcc); % lengte vector resulterende versnelling
area = cumtrapz(RAcc(:,1)).*DeltaT; % integraal(oppervlakte) nemen van
resulterende versnelling (geeft de snelheid terug)

list = pts - (1:winpts);
num_combinations = sum(list); % hoeveelheid combinaties

% lege matrixen aanmaken met aantal rijen voor de hoeveelheid
% combinaties:
I = zeros(num_combinations,1);
J = zeros(num_combinations,1);
F = zeros(num_combinations,1);
r_start = 1;

% berekenen tijdspunten t1, t2 en 1/(t2-t1)
% voor elke tijdstap binnen het gekozen limiet voor de HIC
for i = 1:winpts
    r_end = r_start-1+pts-i;
    I(r_start:r_end) = i; % t2 bepalen
    J(r_start:r_end) = 1:(pts-i); % t1 bepalen
    F(r_start:r_end) = 1/(i*DeltaT); % eerste deel HIC formule: 1/(t2-t1)
    r_start = r_end+1;
end

avgAcc_vec = F.*(area(J+I)-area(J)); % gebied nemen onder piek
Power2_5 = avgAcc_vec.*avgAcc_vec.*sqrt(avgAcc_vec); % macht 2.5 nemen
Temp = Power2_5.*I*DeltaT; % macht 2.5 vermenigvuldigen met (t2-t1)
[HICvalue, index] = max(Temp); % maximale waarde nemen voor bepalen HIC
waarde
iT1 = J(index); % index van t1 voor gebied waar HIC over
berekend is
iT2 = J(index) + I(index); % index van t2 voor gebied waar HIC over
berekend is
avgAcc = avgAcc_vec(index);

end
```

Matlabfunctie: Bepalen Positie, snelheid en oriëntatie

```
% Invoer: t_orientatie - tijdsmatrix van de versnellingsdata en hoeksnelheid
%          Acc - matrix van de versnellingsdata met drie kolommen (x,y,z)
%          Gyro - matrix van gyroscoopdata met drie kolommen (roll, yaw, pitch)
%
% Uitvoer: Acc_world - versnellingsdata op de 3 assen (x,y,z) in het
wereldcoördinatenstelsel
%          positie - positie van de IMU ten opzichte van zijn beginpositie
%          orientatie - matrix van geïntegreerde hoeken met drie kolommen (roll,
yaw, pitch)

function [Acc_world, positie, orientatie] = Positie_IMU_val(t_orientatie,
inOrientatie, inPositie, Acc, Gyro)
    % Parameters voor de positiebepaling
    dt = t_orientatie(2) - t_orientatie(1);
    inSnelheid = [0 0 0];
    positie = inPositie;
    snelheid = inSnelheid;
    orientatie = inOrientatie;

    Acc_world = zeros(length(t_orientatie), 3); % Verander de dimensies van
Acc_world

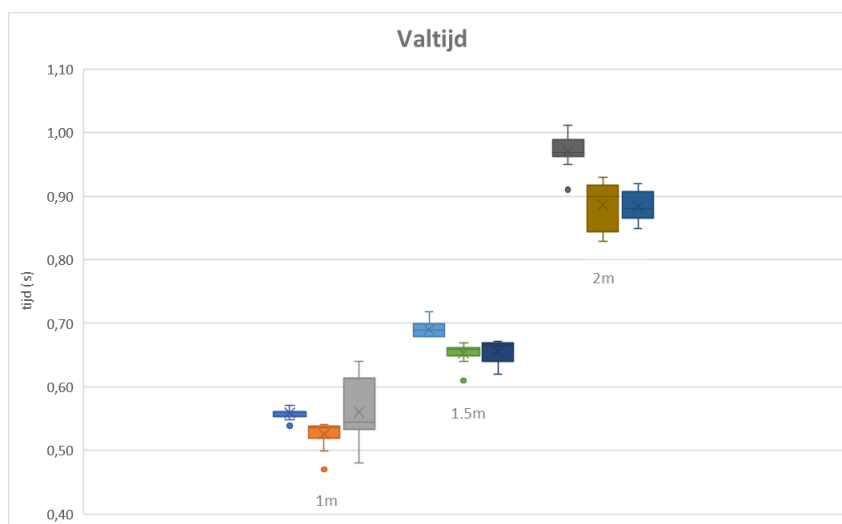
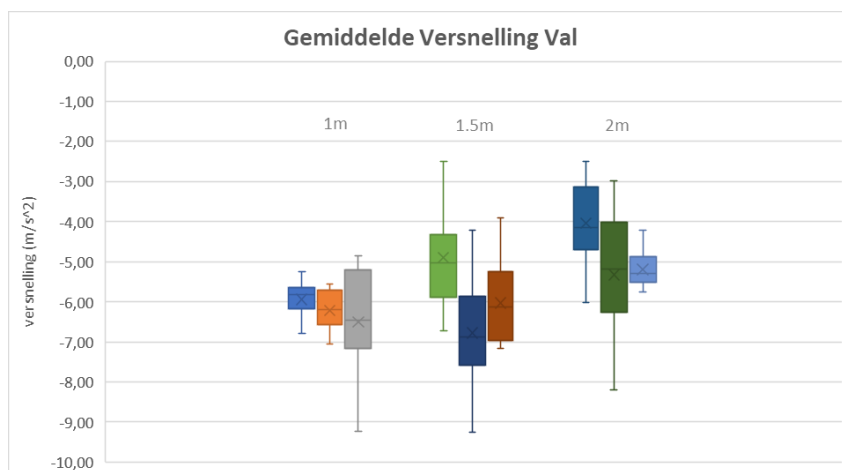
    % Bepaal de positie van de IMU tijdens de val
    for i = 2:length(t_orientatie)
        % Bereken de versnelling in het wereldcoördinatensysteem
        R = eul2rotm(orientatie(i-1,:), 'XYZ'); % Omzetten van Euler-hoeken naar
rotatiematrix (3x3)
        Acc_world(i,:) = (R * Acc(i,:))'; % Verander de transponering

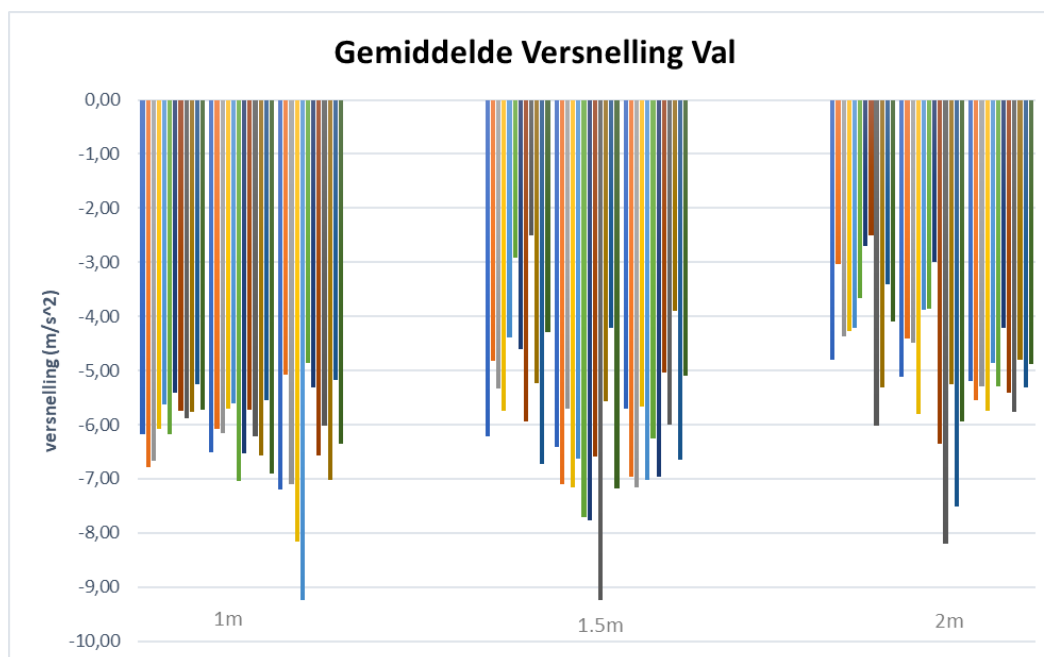
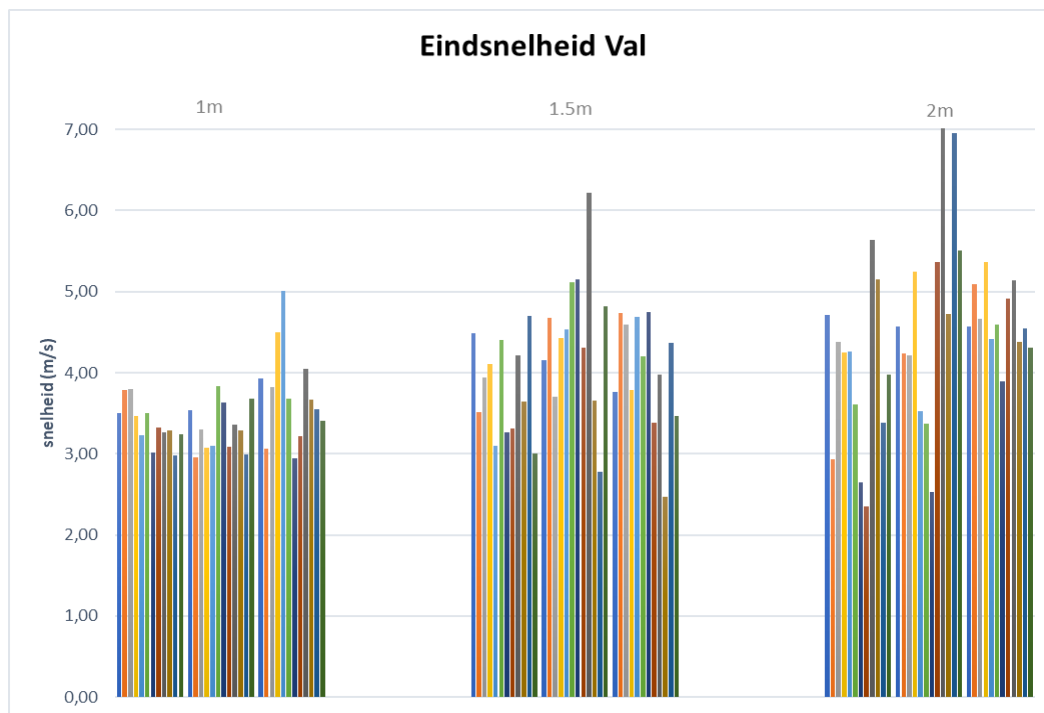
        % Bereken de positie en snelheid met behulp van de versnelling
        snelheid = snelheid + Acc_world(i-1,:) .* dt;
        positie(i,:) = positie(i-1,:) + snelheid .* dt;

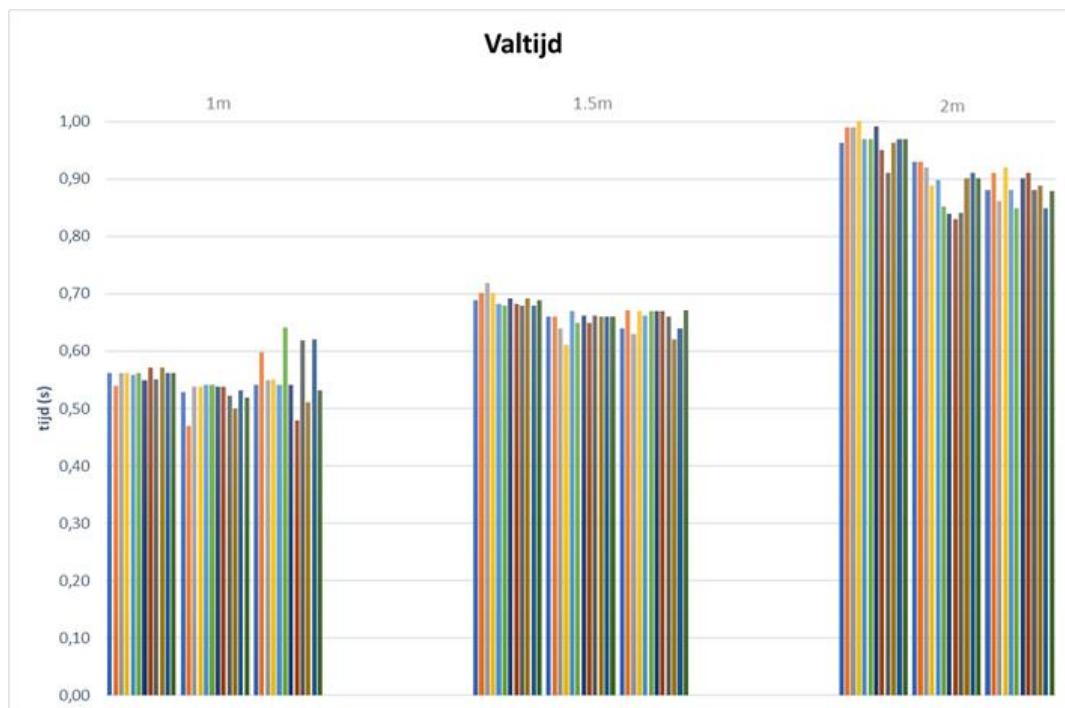
        % Bereken de nieuwe oriëntatie (hoeken) met behulp van de gyroscoopdata
        orientatie(i,:) = orientatie(i-1,:) + Gyro(i,:) .* dt;
    end
end
```

Bijlage 11: Resultaten Betrouwbaarheid Meetopstelling

	1,0 m			1,5 m			2,0 m		
meetmoment	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Eindsnelheid (m/s)	-5,94±0,46	-6,22±0,50	-6,50±1,33	-4,90±1,26	-6,78±1,27	-6,03±1,00	-4,03±1,05	-5,32±1,54	-5,19±0,44
gemiddelde versnelling (m/s ²)	3,37±0,26	3,32±0,29	3,73±0,59	3,81±0,58	4,46±0,87	4,01±0,69	3,94±1,00	4,77±1,35	4,66±0,41
Valtijd (s)	0,56±0,01	0,53±0,02	0,56±0,05	0,69±0,01	0,65±0,02	0,66±0,02	0,97±0,03	0,89±0,04	0,88±0,02

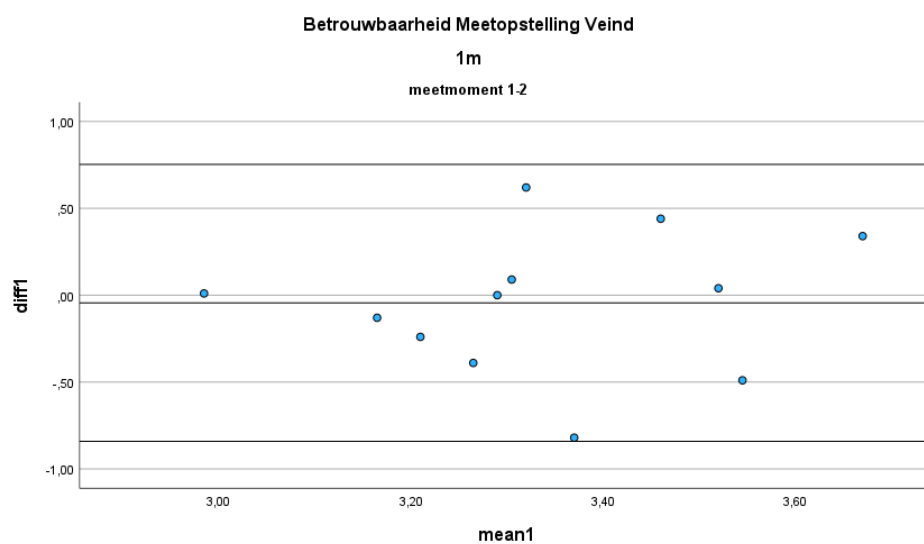


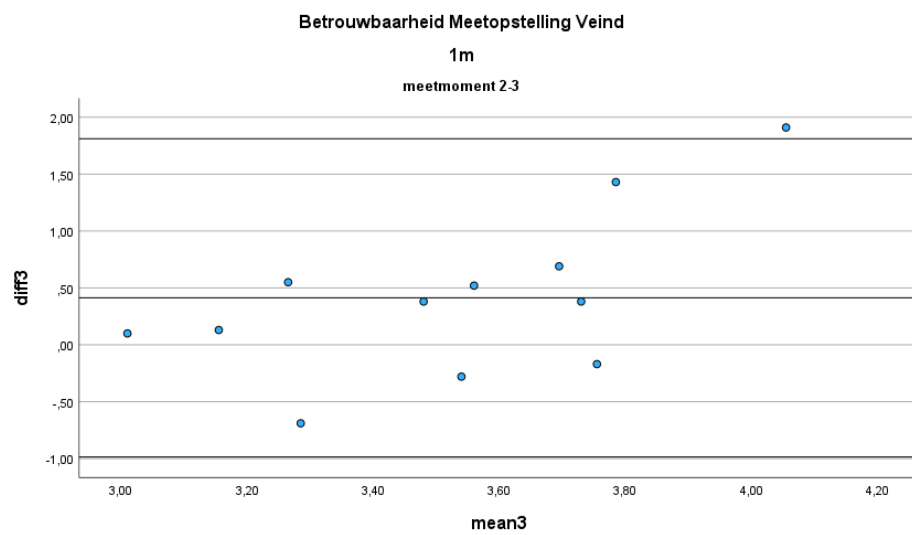
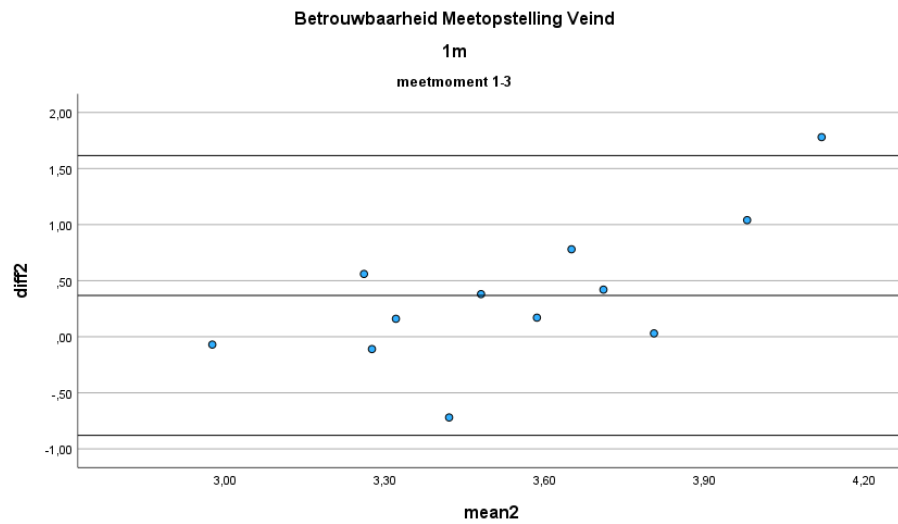




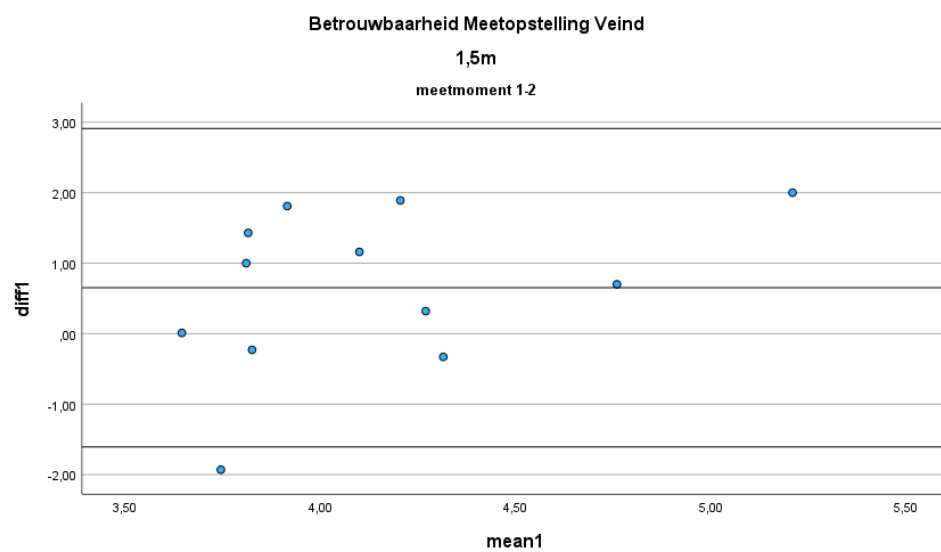
Bland Altman Plots

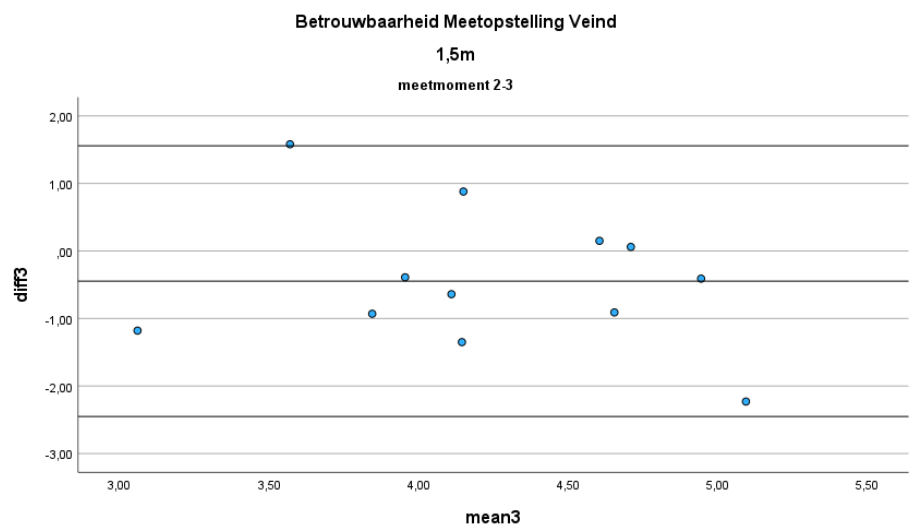
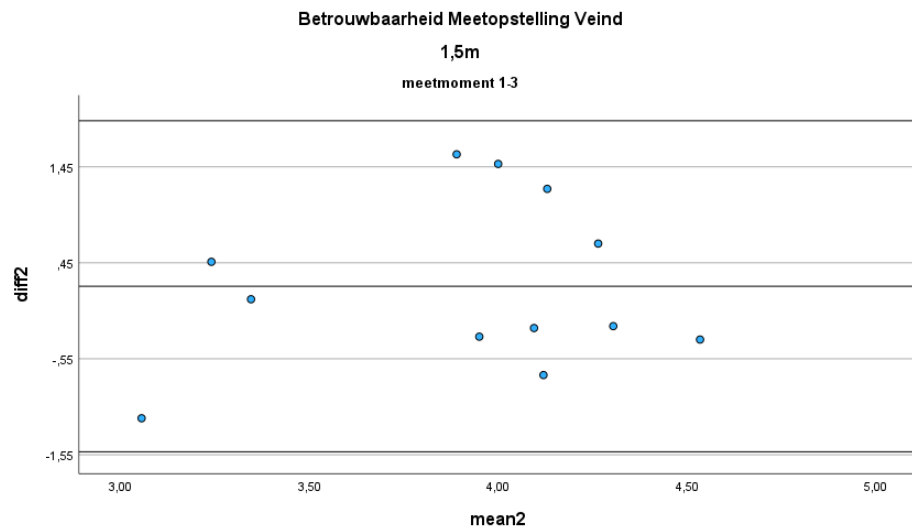
1m



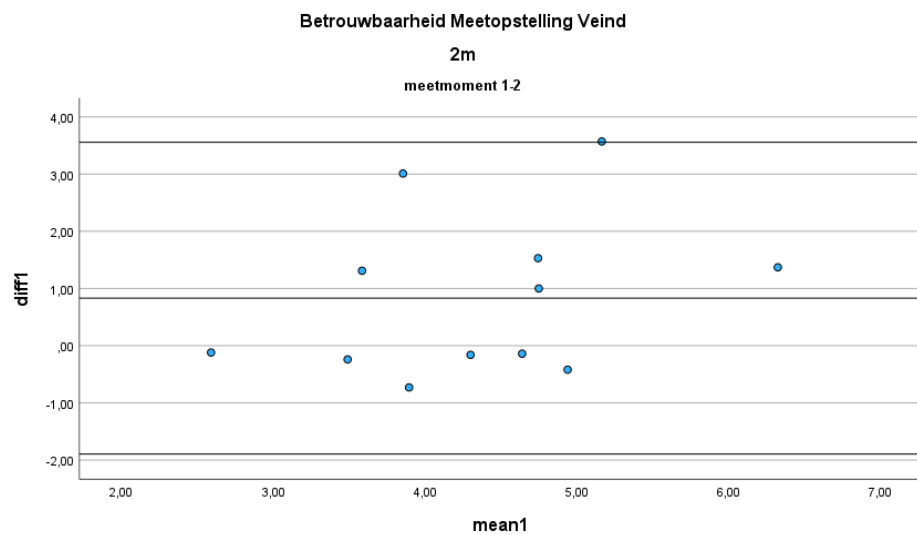


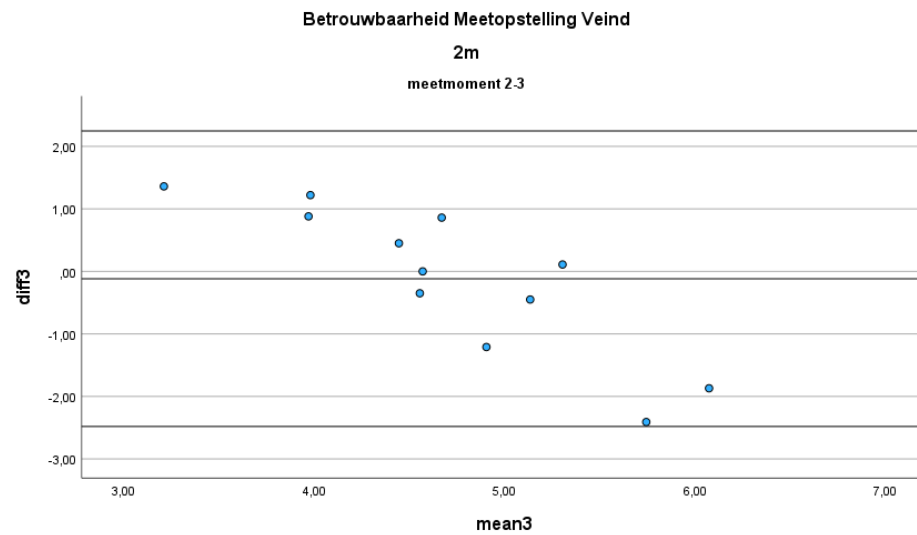
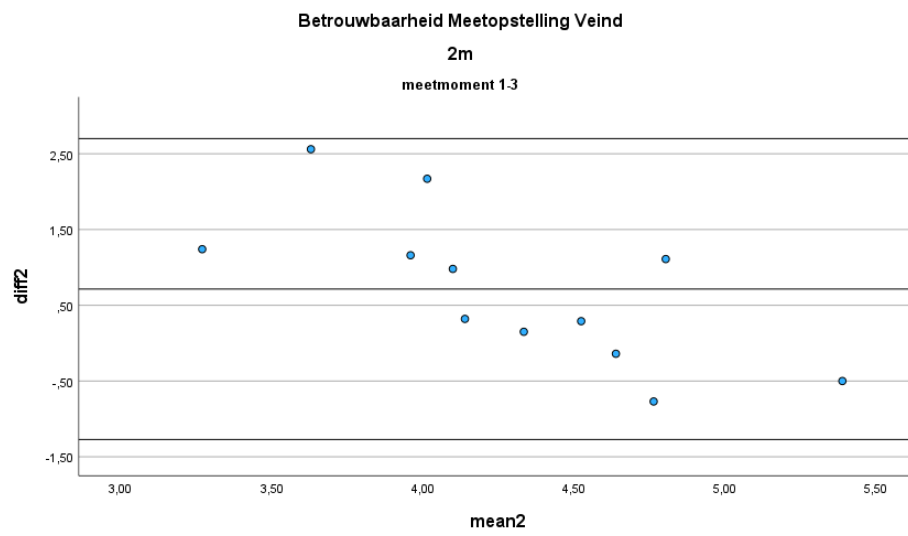
1.5m





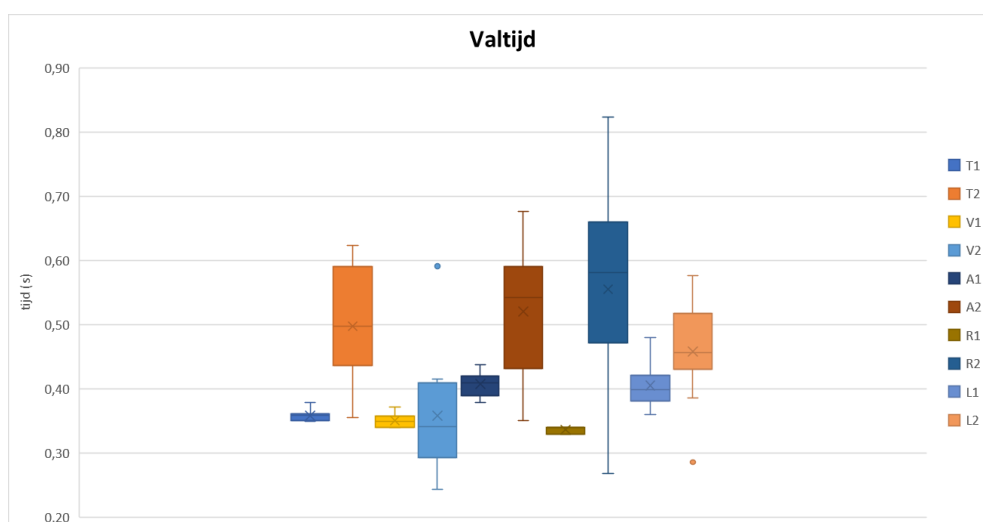
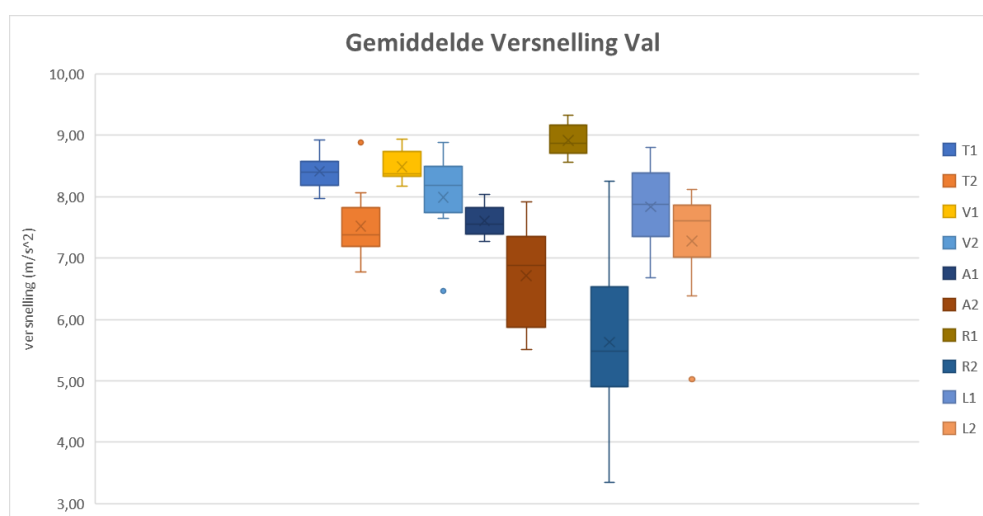
2m

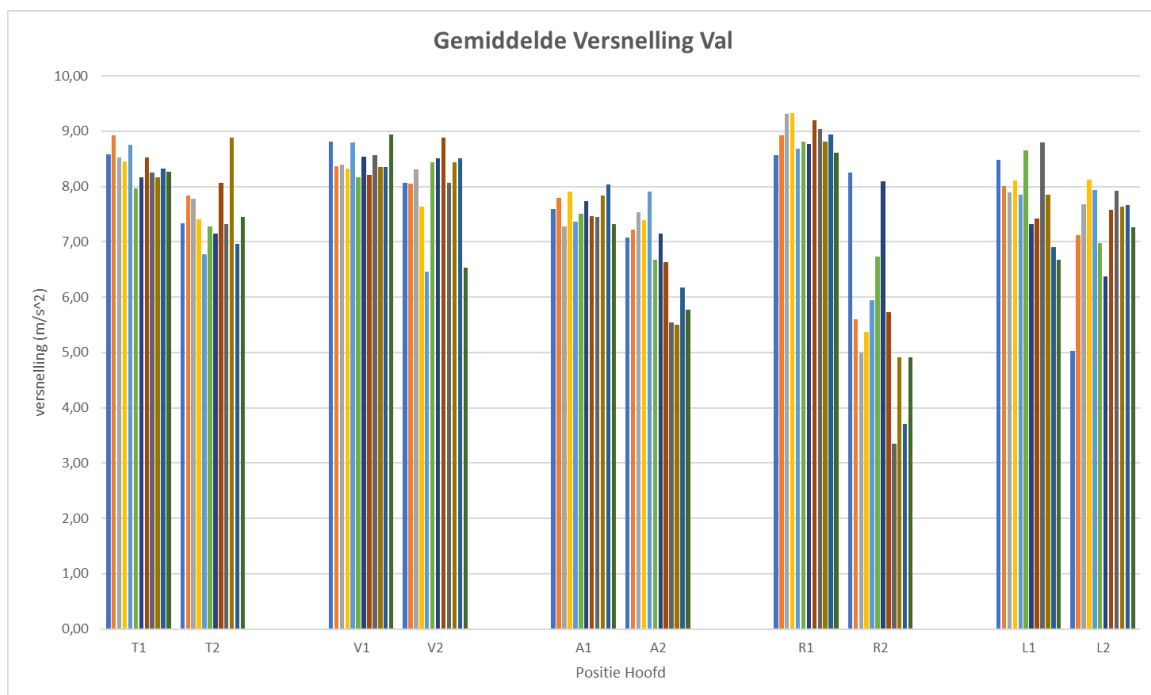
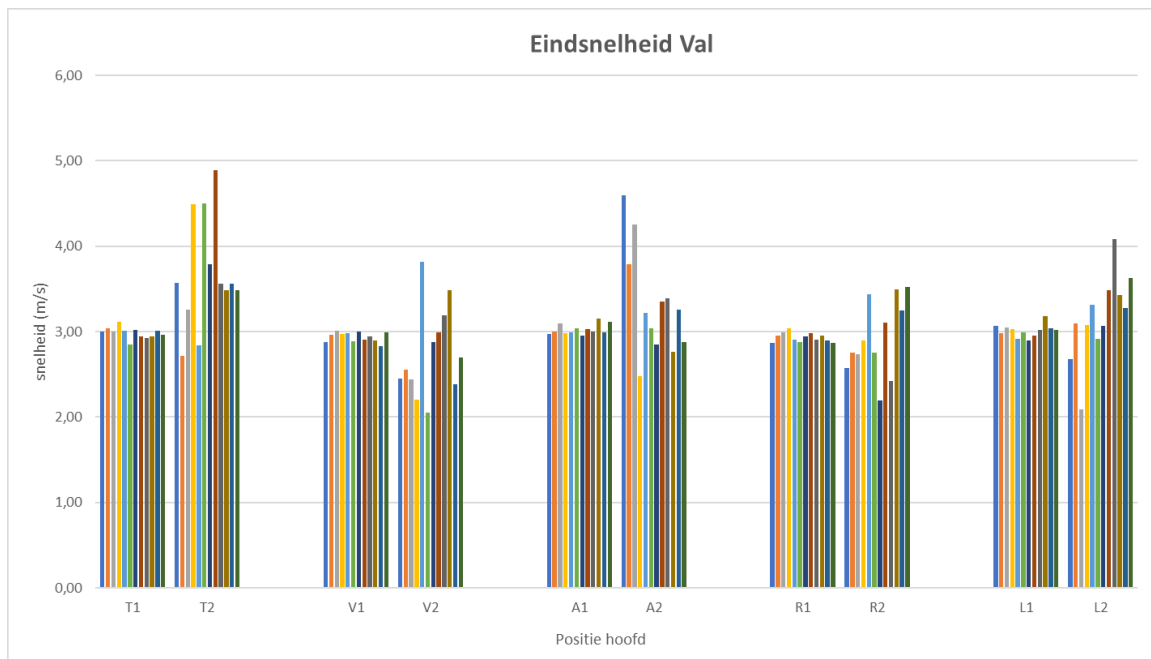


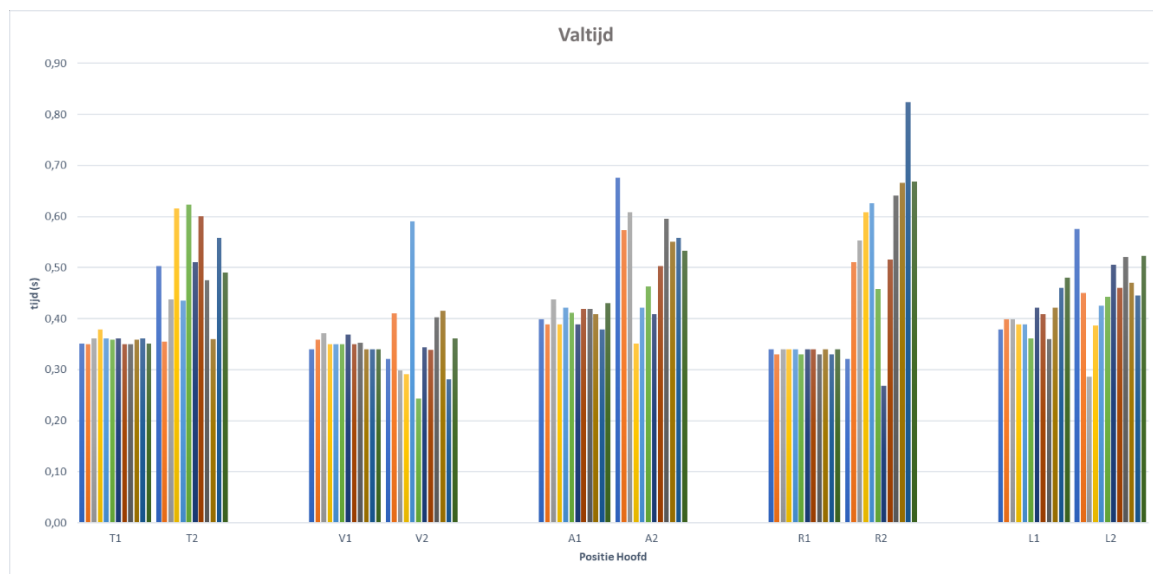


Bijlage 12: Resultaten Betrouwbaarheid Hoofdvorm

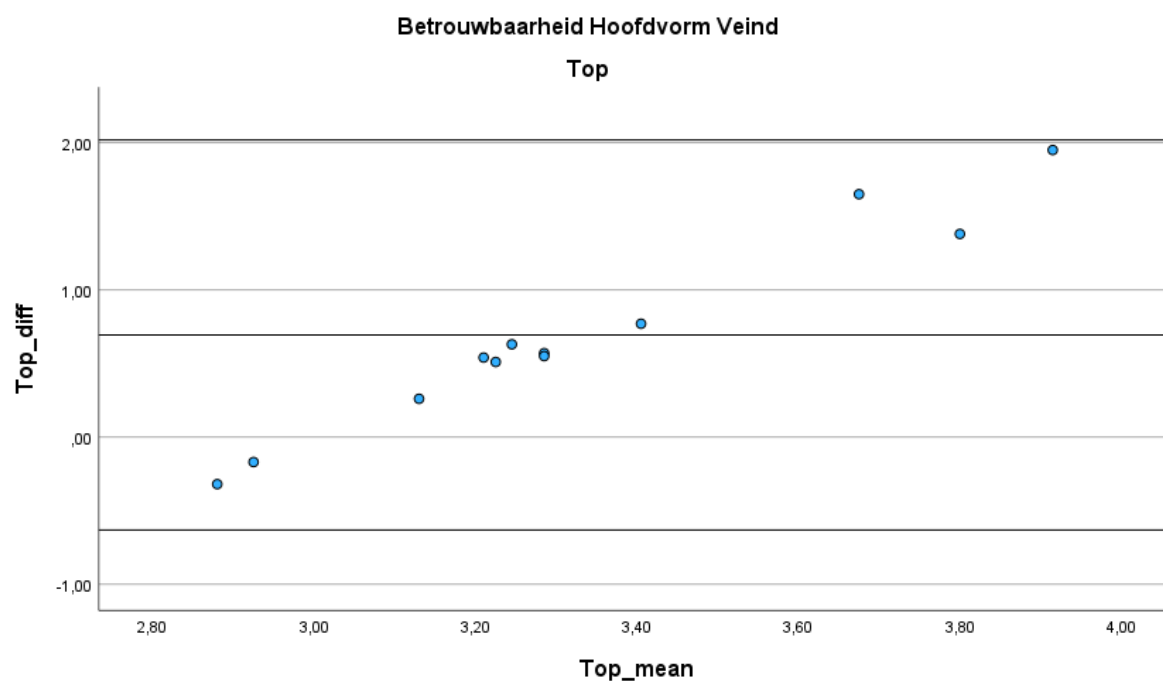
	TOP		VOOR		ACHTER		RECHTS		LINKS	
Meetmoment	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Snelheid einde val (m/s)	2,98±0,07	3,68±0,66	2,94±0,06	2,76±0,53	3,03±0,06	3,32±0,62	2,93±0,05	2,93±0,44	3,01±0,08	3,18±0,50
Gemiddelde versnelling (m/s ²)	8,41±0,27	7,52±0,56	8,48±0,25	7,99±0,77	7,61±0,25	6,72±0,81	8,92±0,26	5,63±1,50	7,83±0,66	7,28±0,86
Valtijd (s)	0,36±0,01	0,50±0,09	0,35±0,01	0,36±0,09	0,40±0,02	0,52±0,09	0,34±0,00	0,56±0,15	0,39±0,02	0,46±0,07

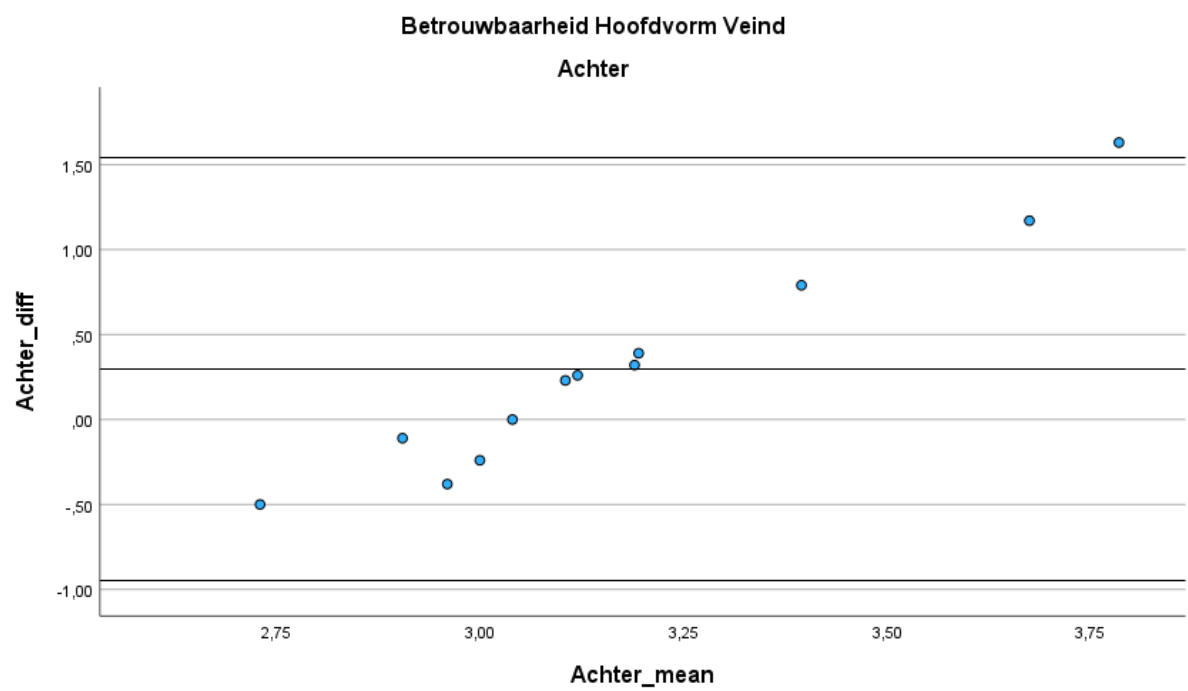
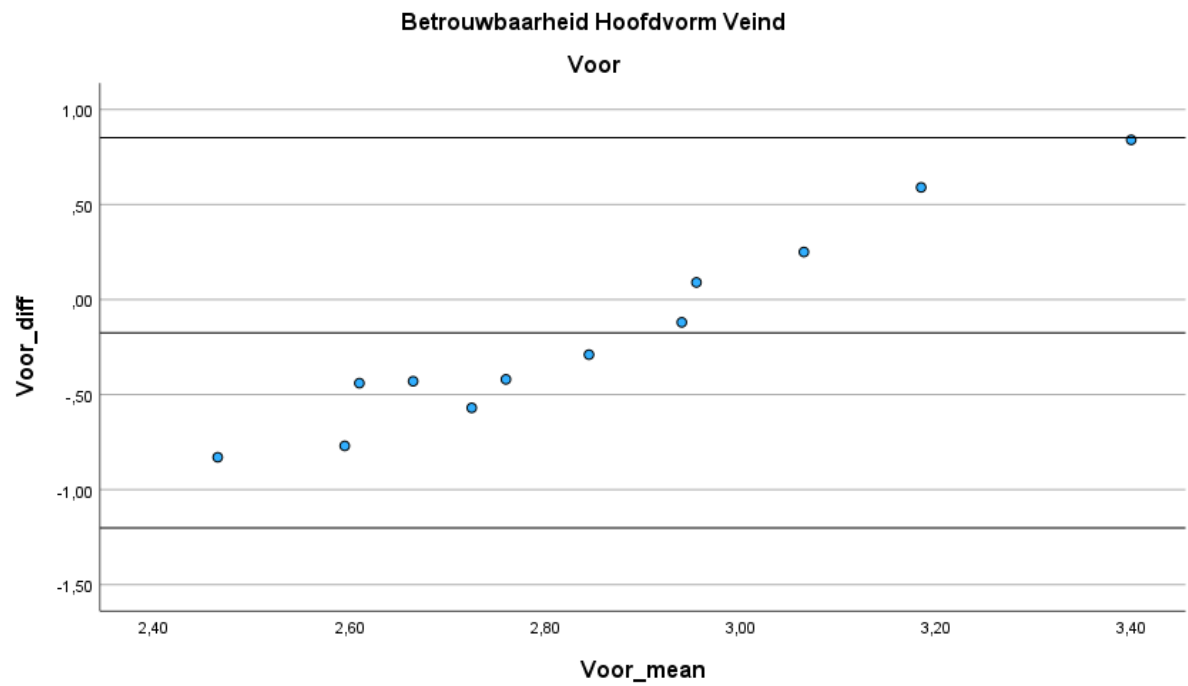


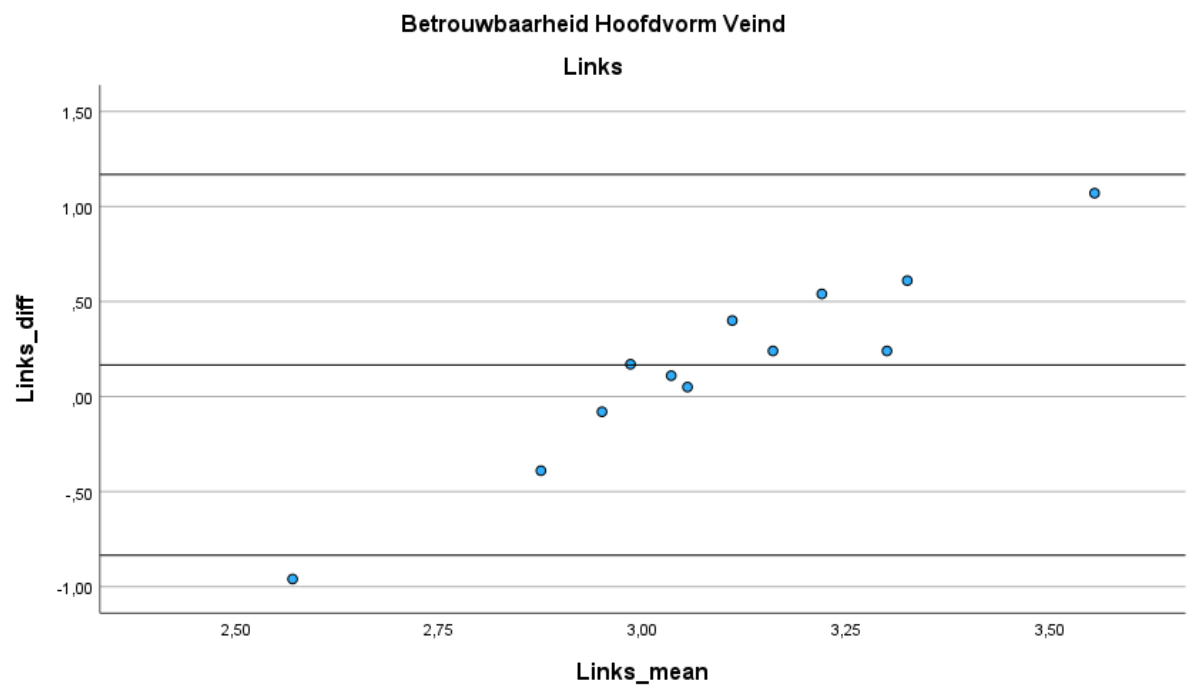
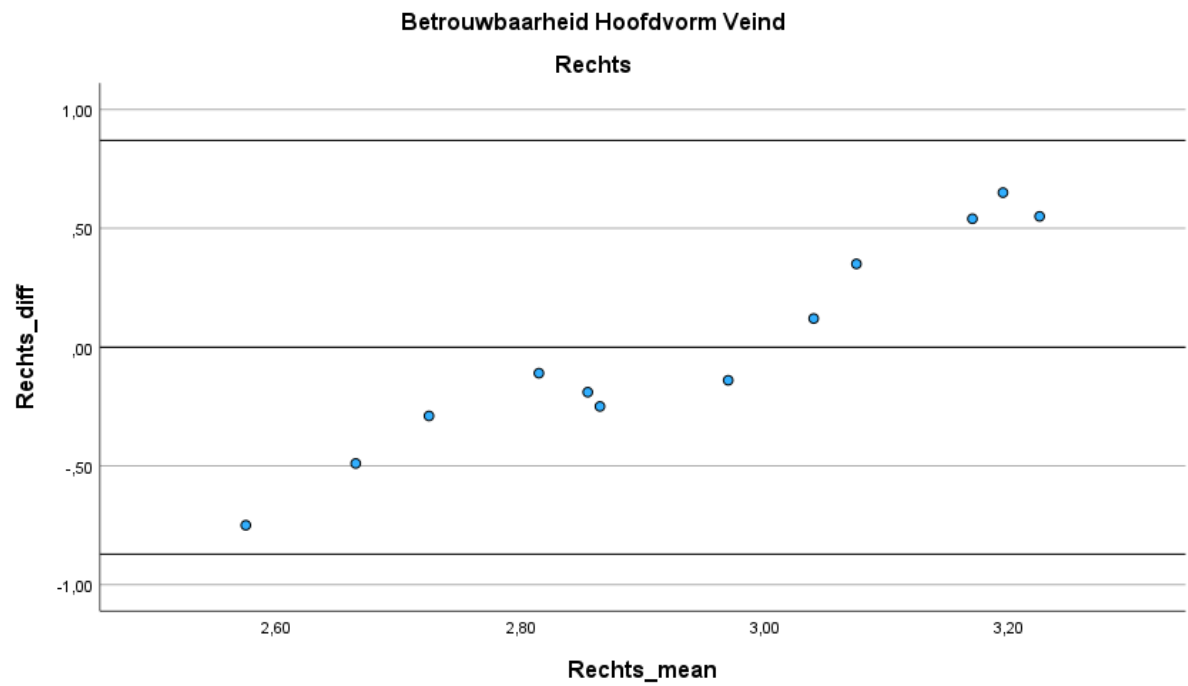




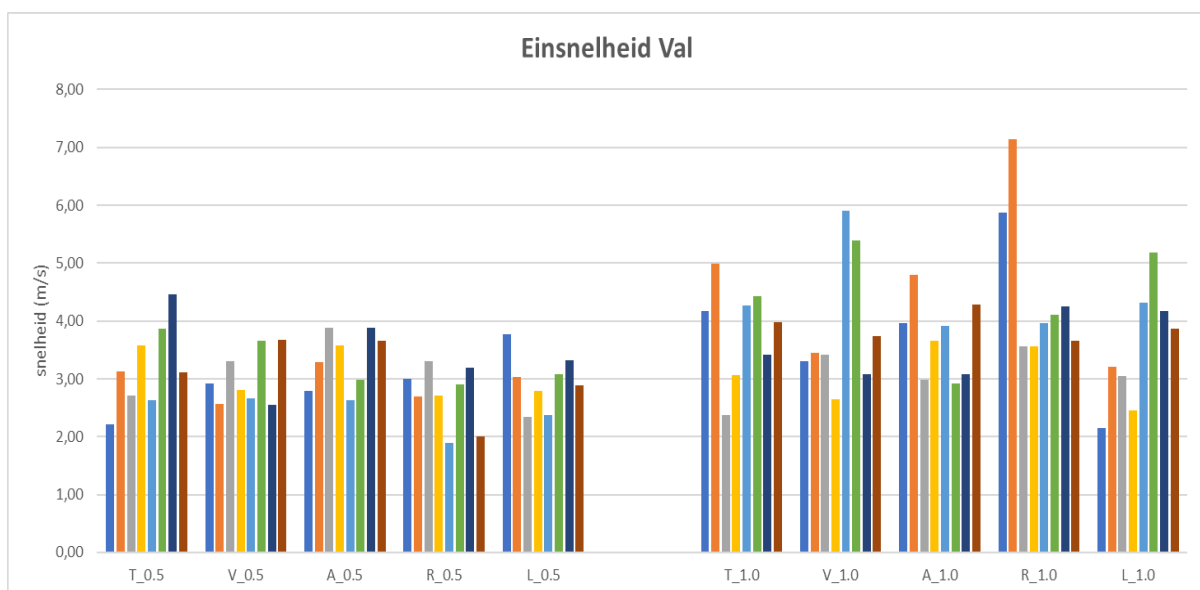
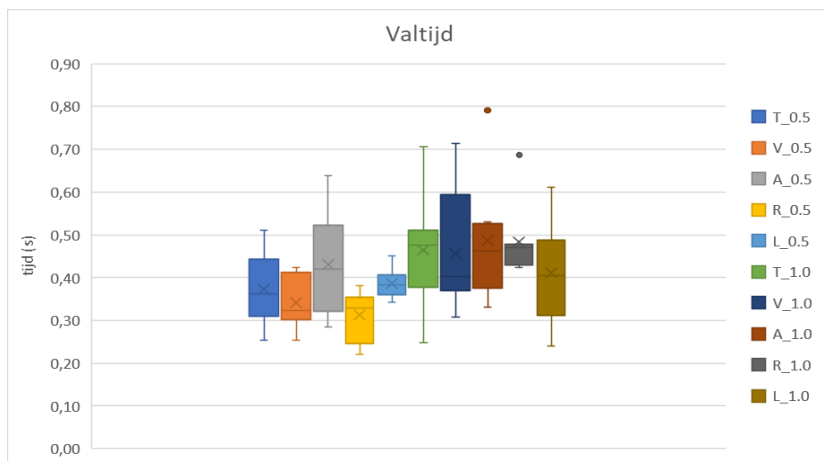
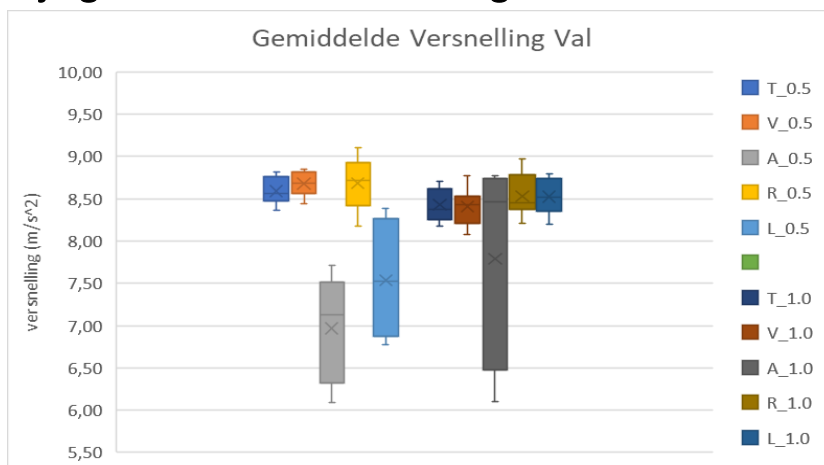
Bland-Altman-Plots

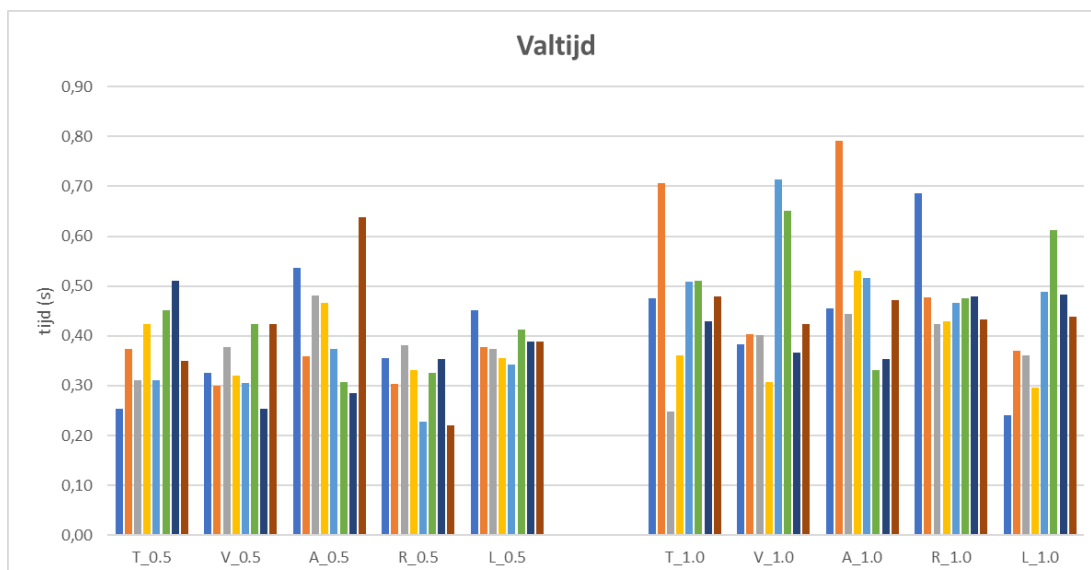
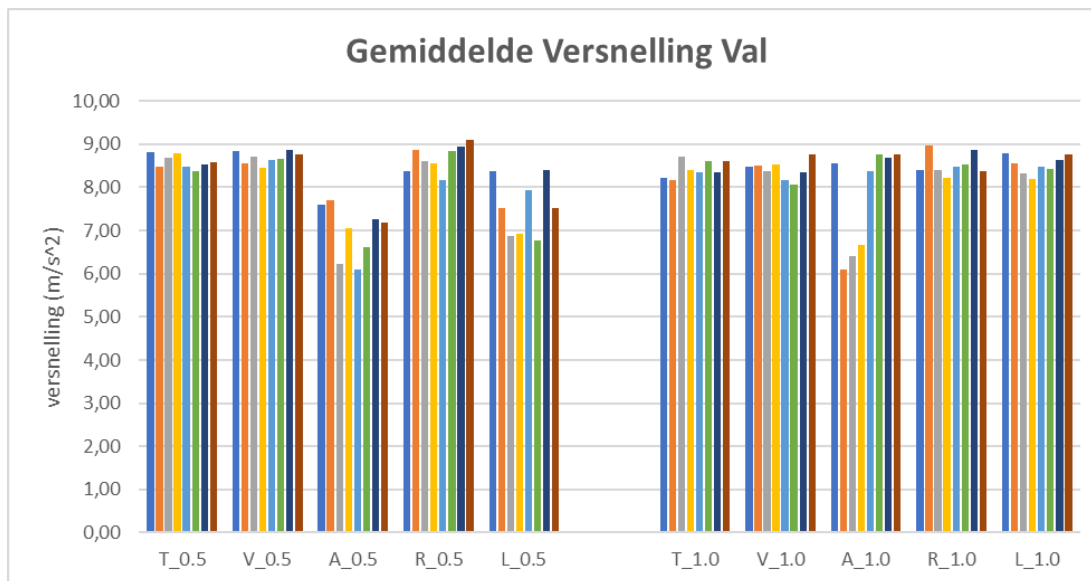






Bijlage 13: Resultaten Metingen Valhelm

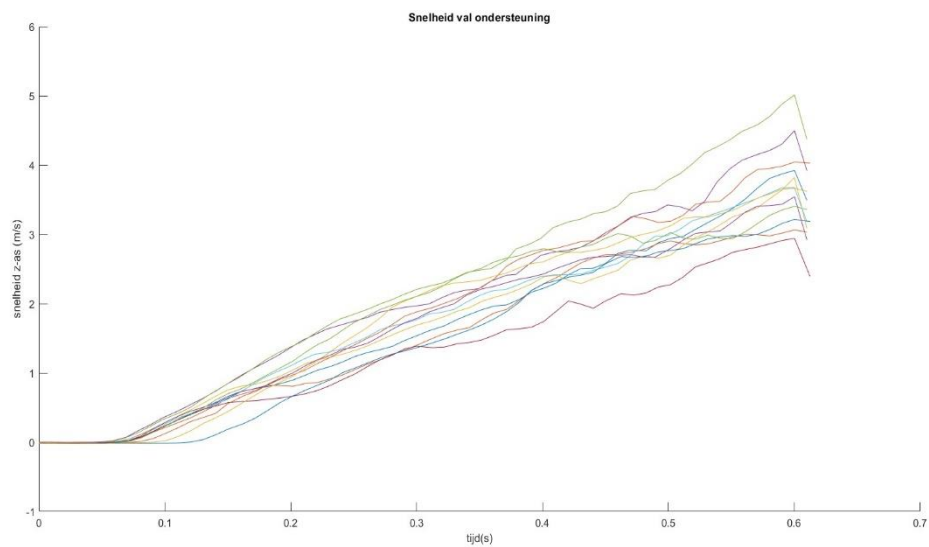




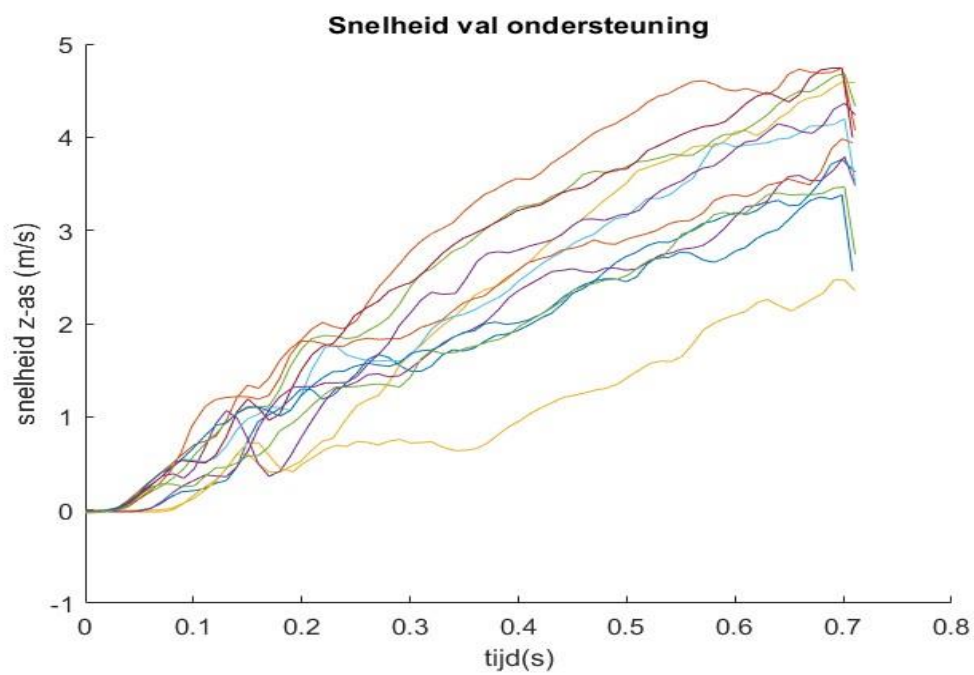
Bijlage 14: Plots voor snelheid val

Betrouwbaarheid meetopstelling

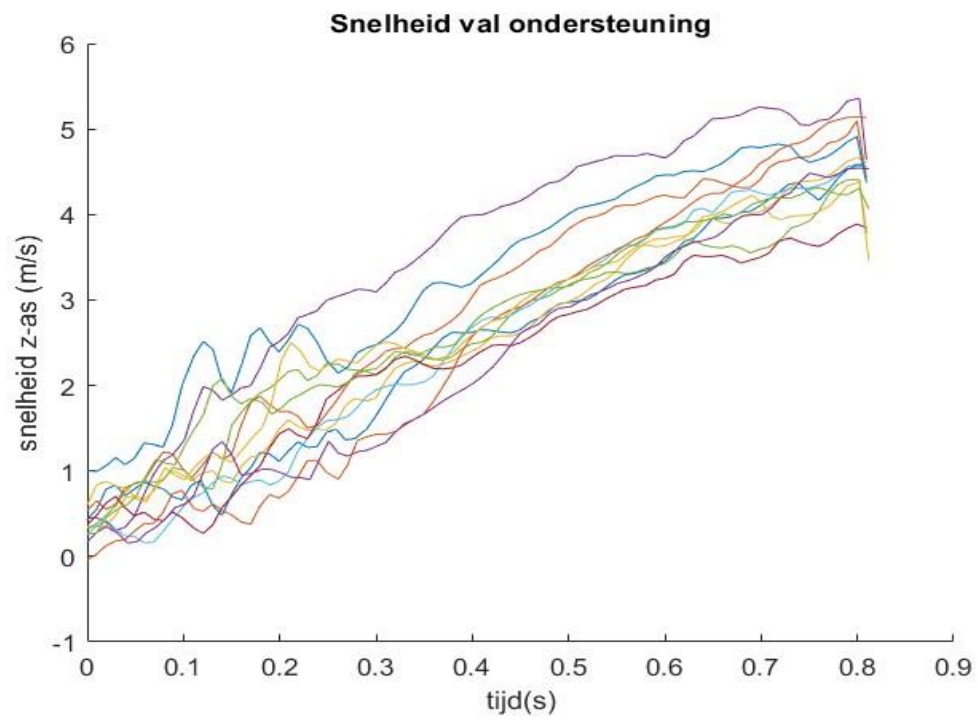
Valhoogte: 1,0 m



Valhoogte: 1,5 m

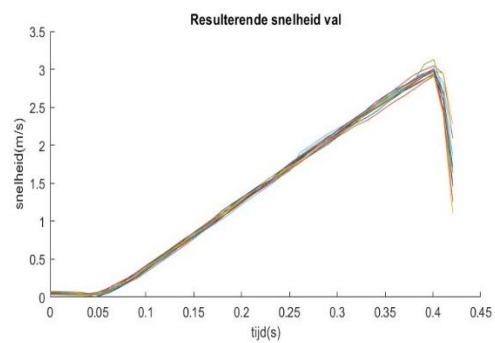
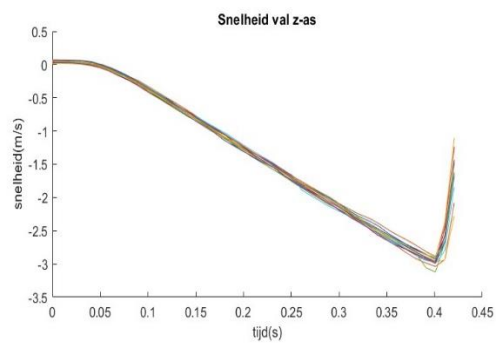
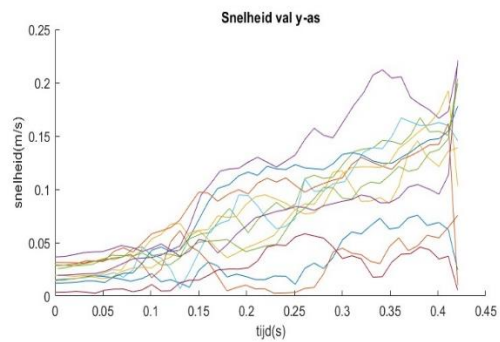
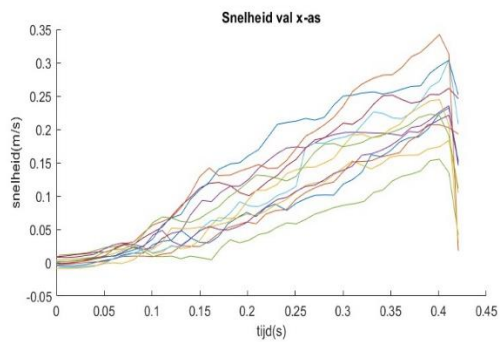


Valhoogte: 2,0 m

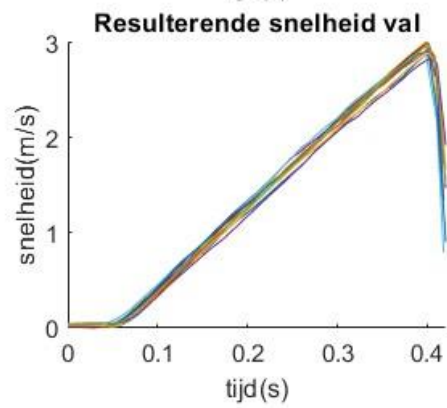
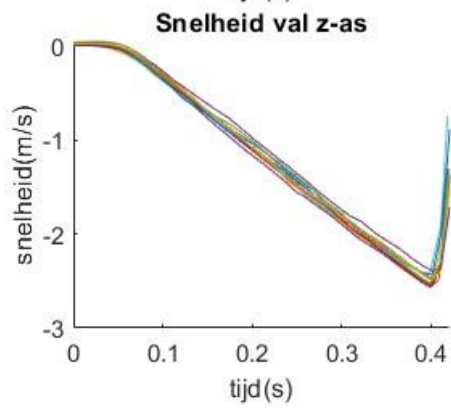
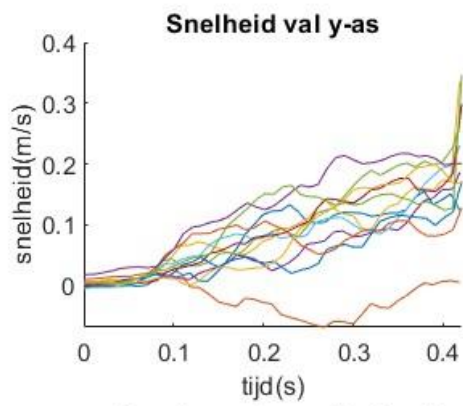
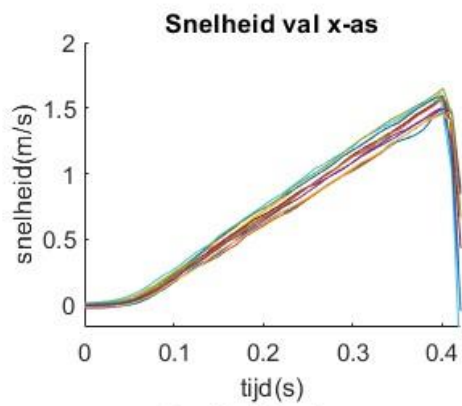


Betrouwbaarheid Hoofdvorm

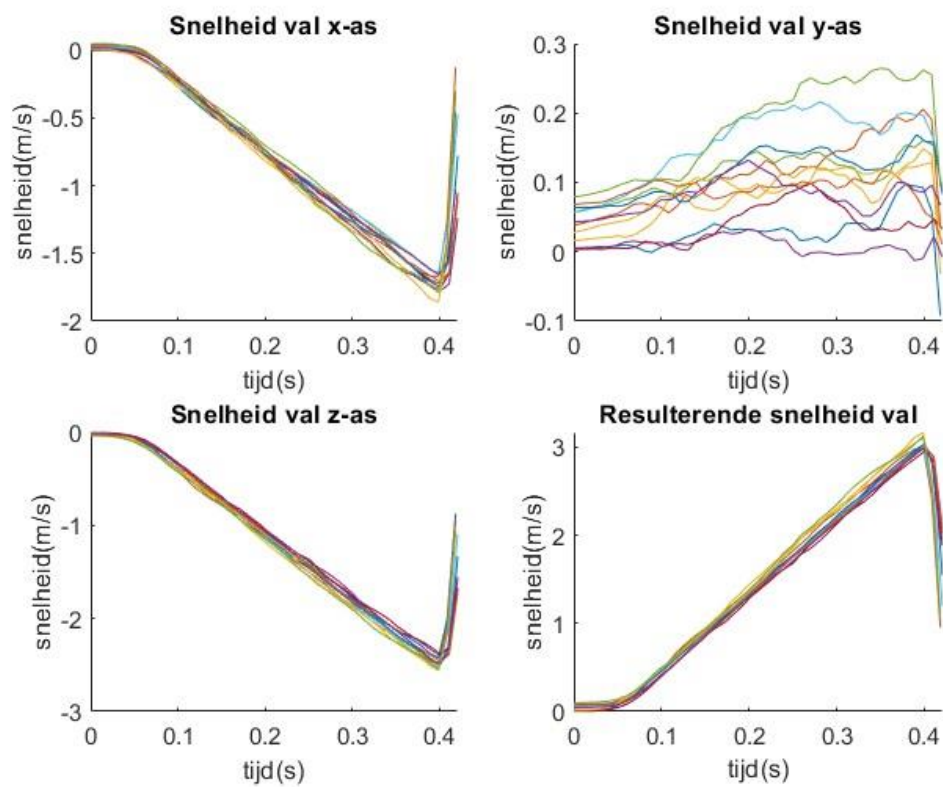
Top



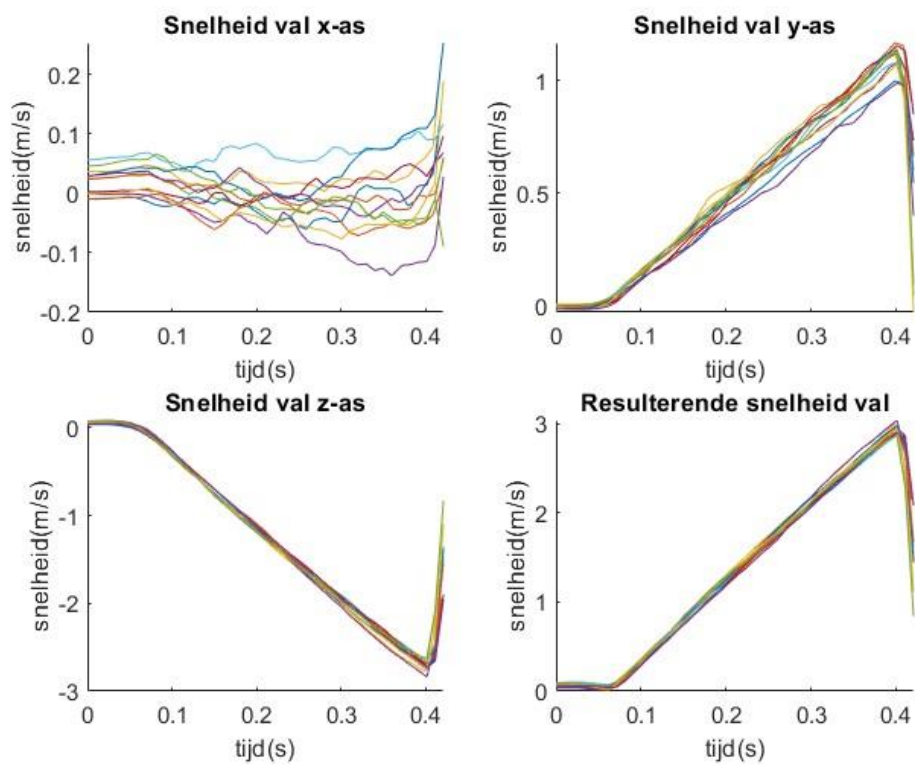
Voor



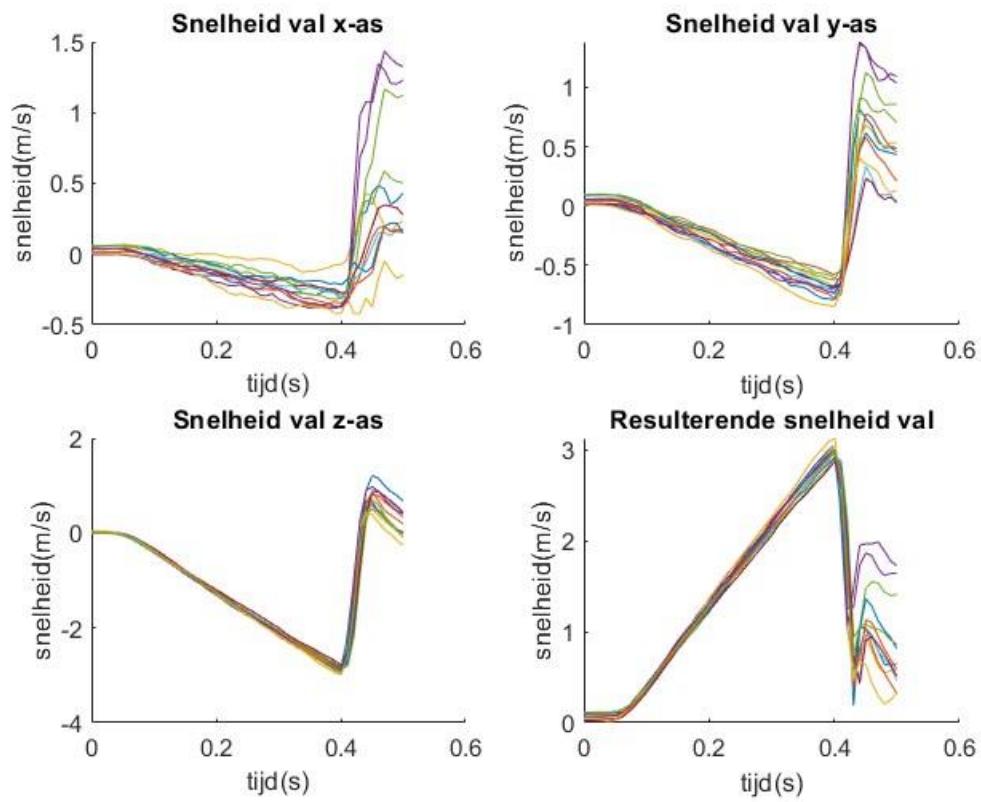
Achter



Rechts



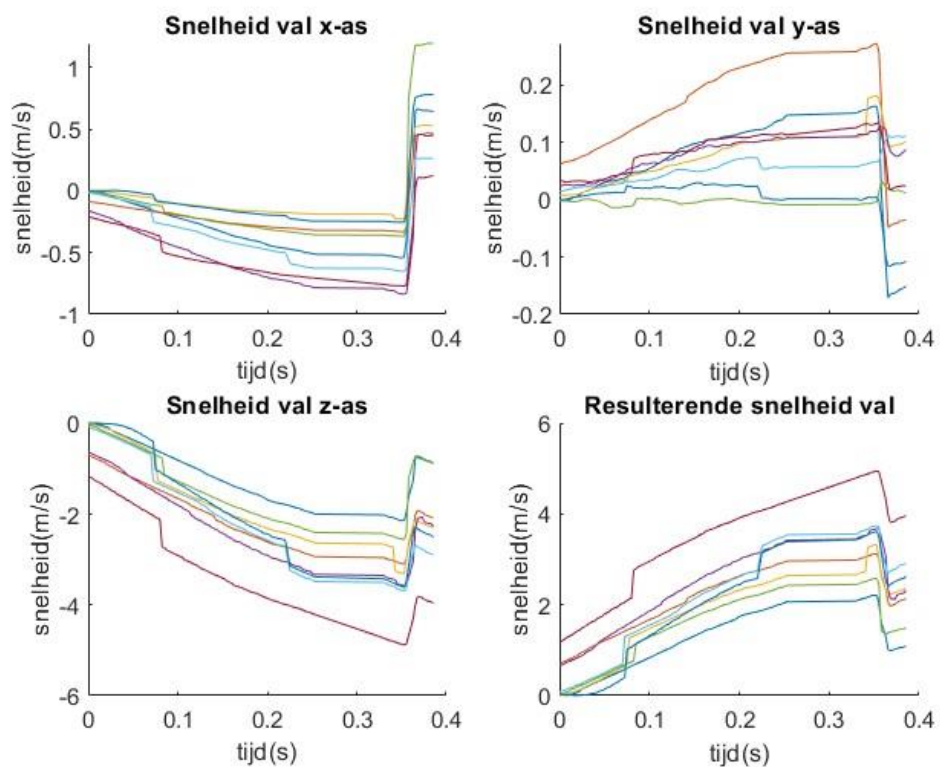
Links



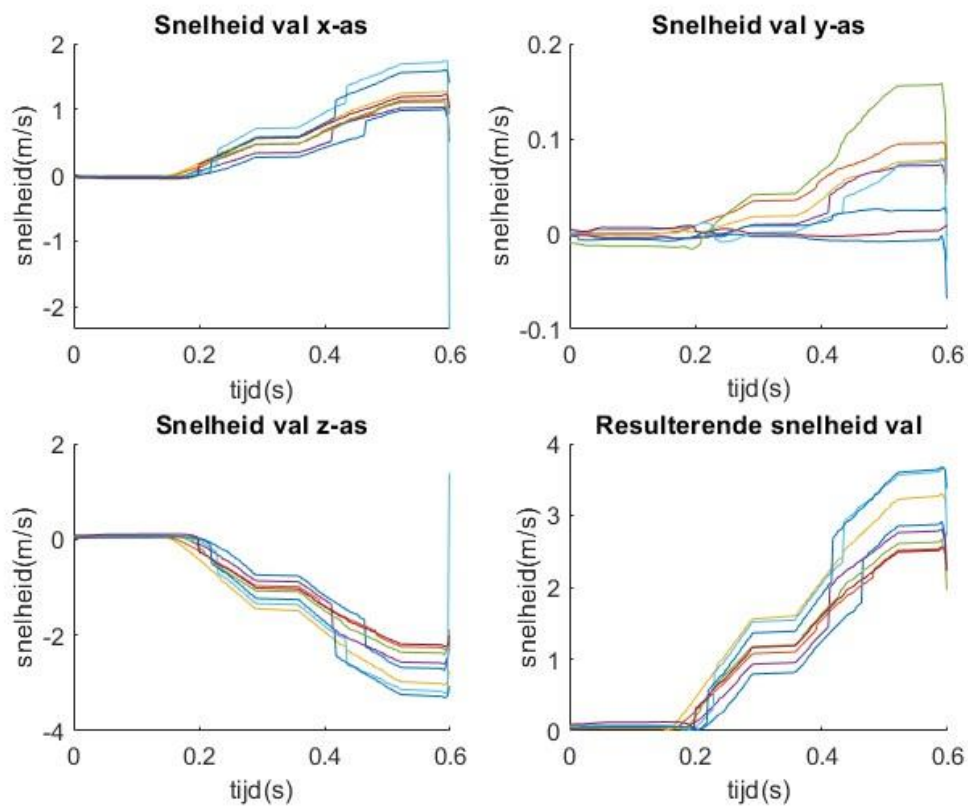
Metingen valhelm

Valhoogte: 0,5 m

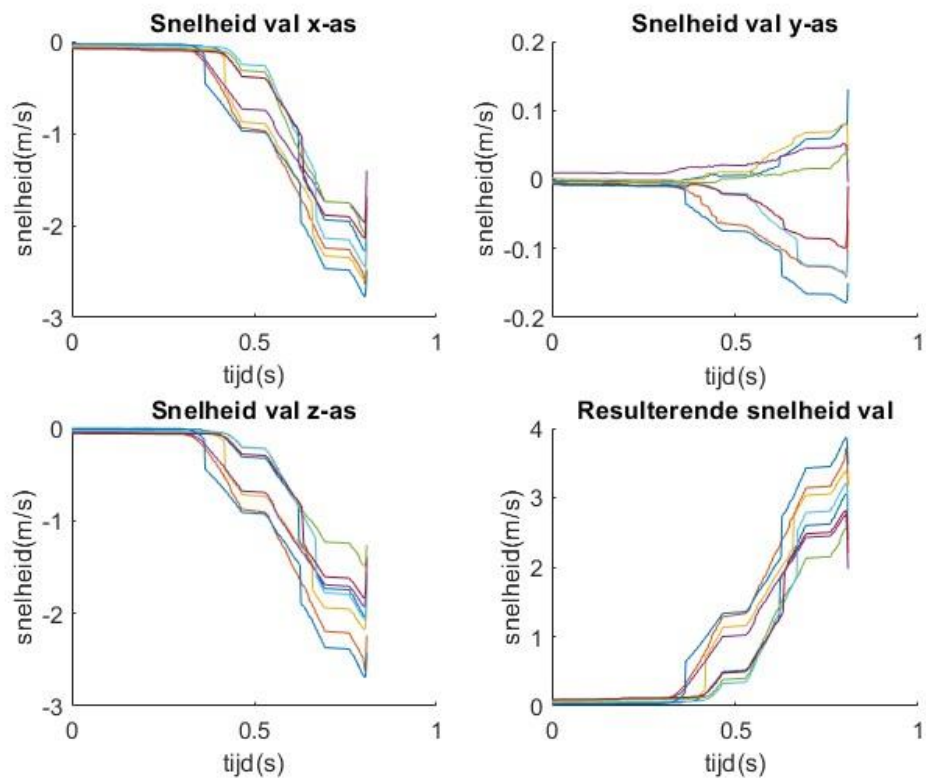
Top



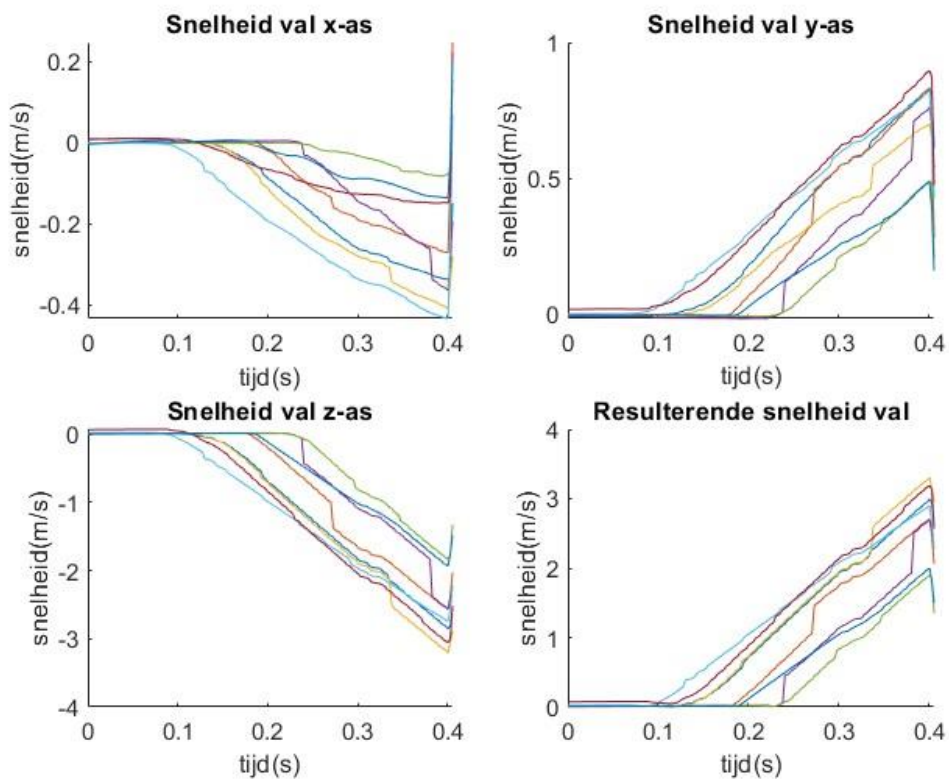
Voor



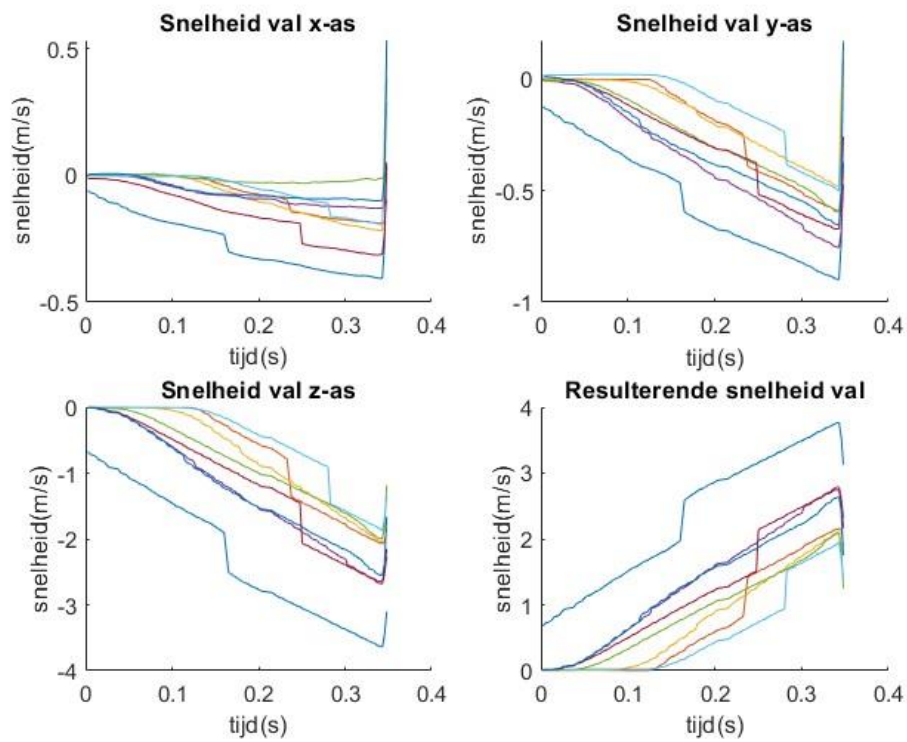
Achter



Rechts

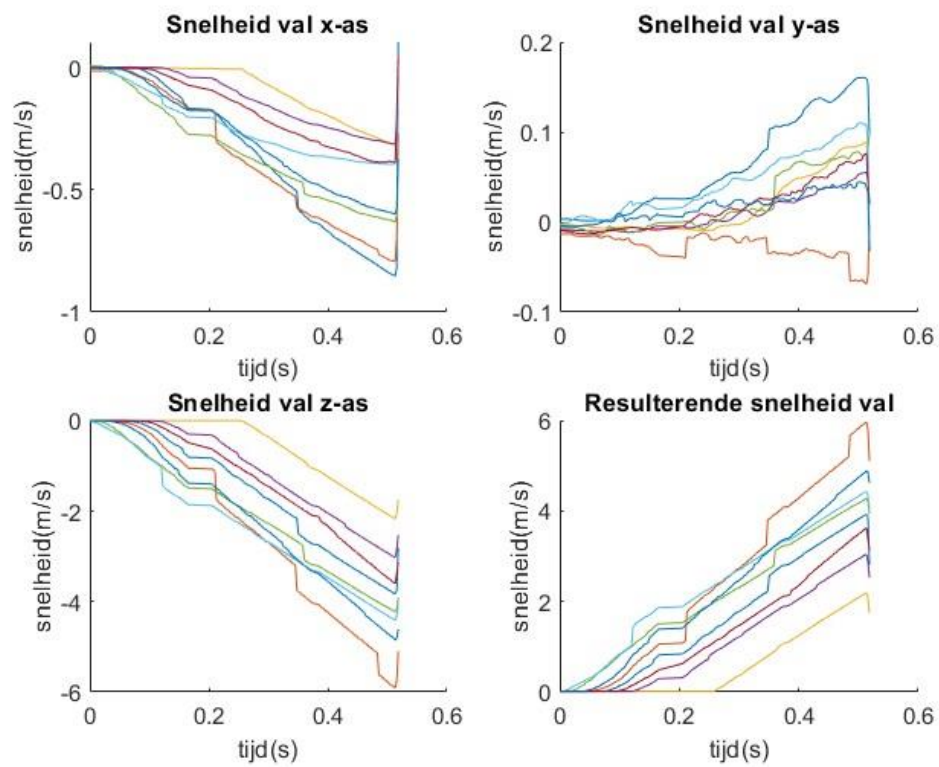


Links

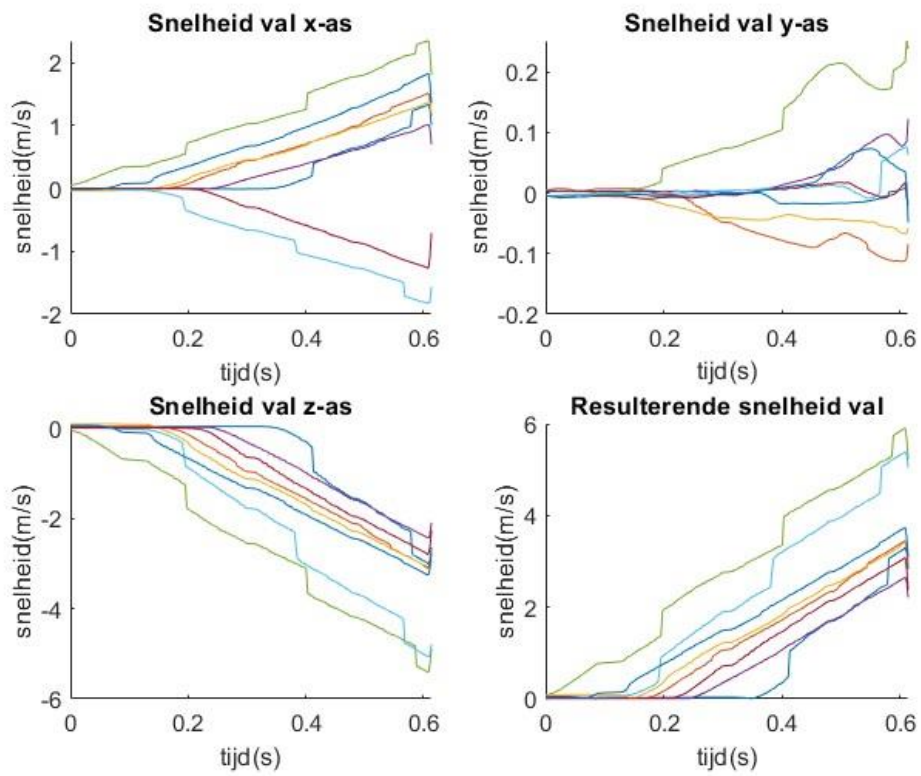


Valhoogte: 1,0 m

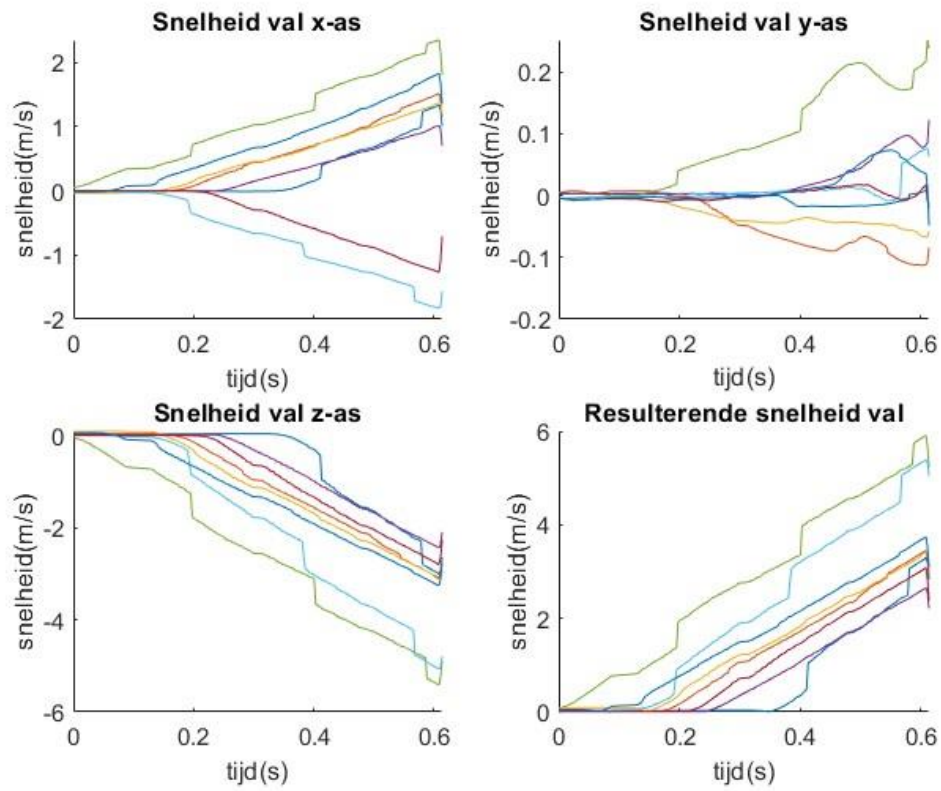
Top



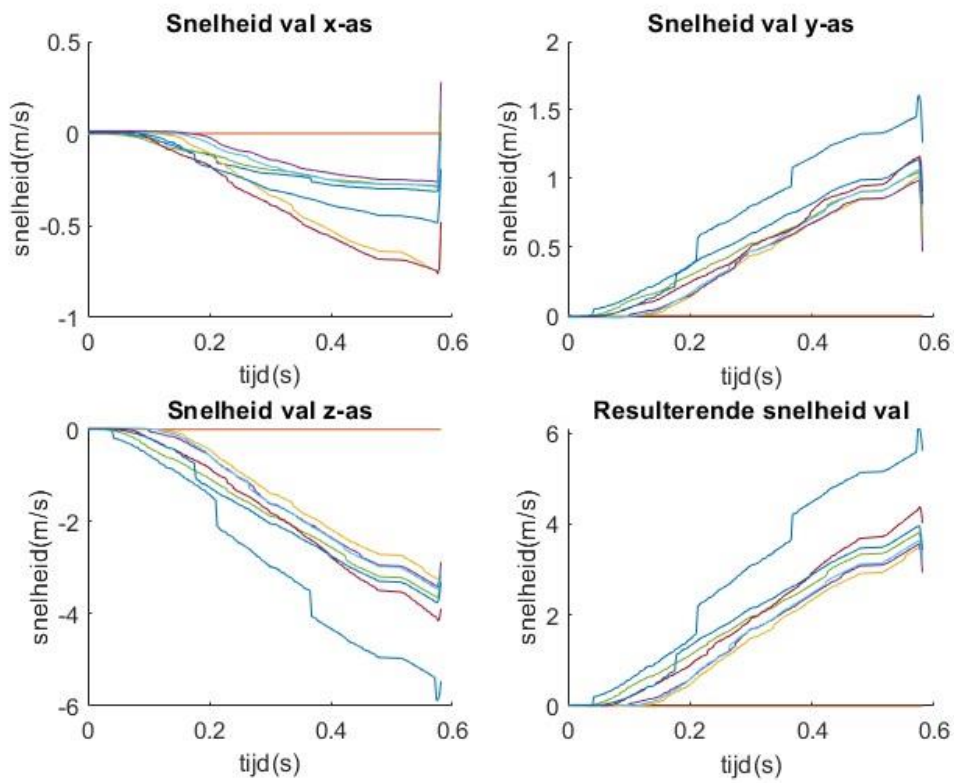
Voor



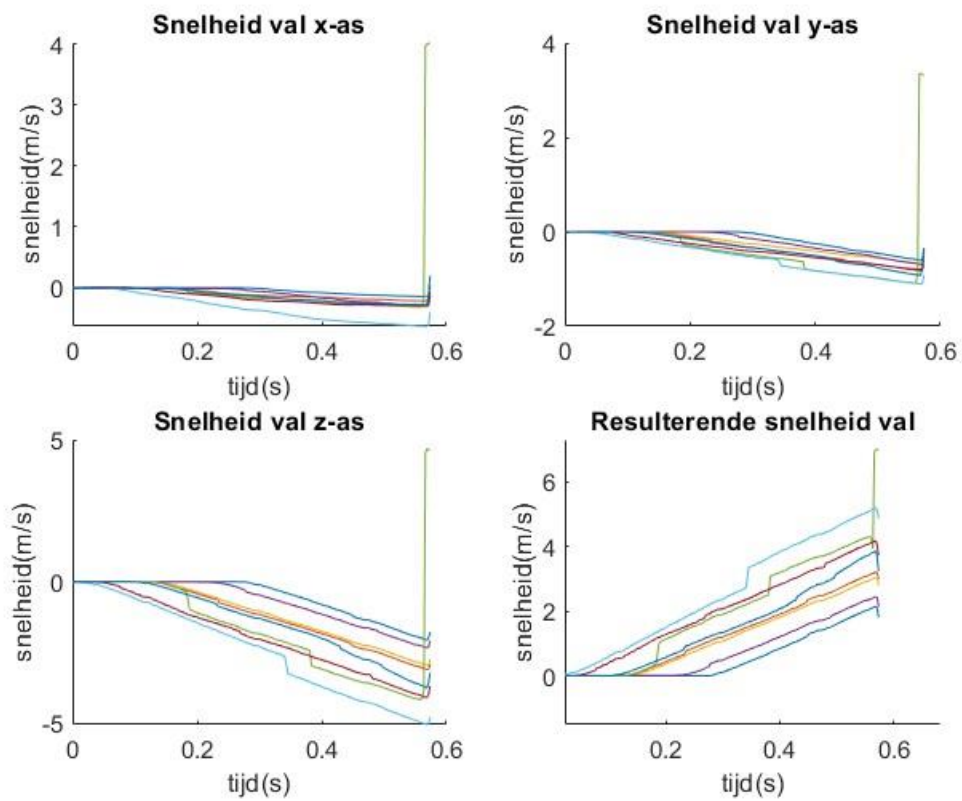
Achter



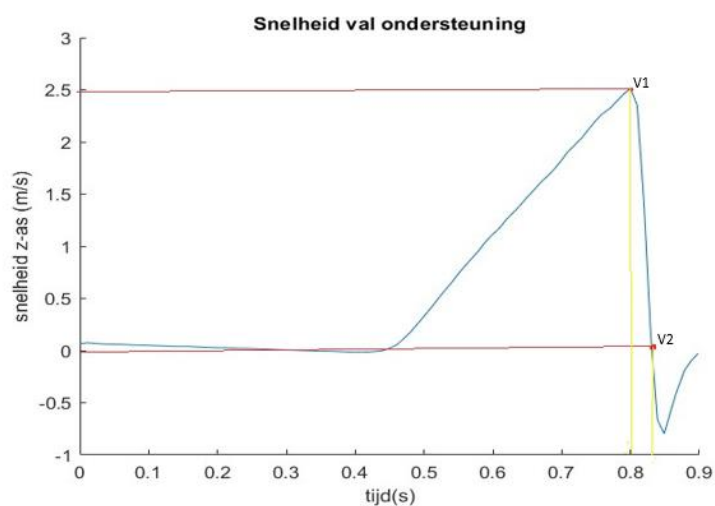
Rechts



Links



Bijlage 15: Berekening Impactversnelling



Betrouwbaarheid Meetopstelling

Valhoogte (m)	1,0	1,5	2,0
Impactversnelling (g)	10,46	10,78	12,83

Betrouwbaarheid Hoofdvorm

Positie Hoofd	Top	Voor	Achter	Rechts	Links
Impactversnelling (g)	9,21	7,99	9,00	10,27	8,74

Metingen Valhelm (valhoogte 0,5m)

Positie Hoofd	Top	Voor	Achter	Rechts	Links
Impactversnelling (g)	13,06	10,63	8,72	7,89	8,16

Bijlage 16: Overzicht Wrijvingskrachten

Meetopstelling

Massa: 1,56 kg

Theoretische kracht (zonder wrijving) : 15,26 N

	1,0 m	1,5 m	2,0 m
Gemiddelde versnelling (m/s ²)	-6,22	-5,90	-4,85
Kracht val (N)	9,68	9,18	7,55
Wrijvingskracht (N)	5,59	6,08	7,72

Meetopstelling inclusief Hoofdvorm bevestigd

Massa: 3,22 kg

Theoretische kracht (zonder wrijving) : 31,57 N

	Top	Voor	Achter	Rechts	Links
Gemiddelde versnelling (m/s ²)	7,97	8,24	7,16	7,28	7,56
Kracht val (N)	25,65	26,51	23,04	23,43	24,33
Wrijvingskracht (N)	5,92	5,06	8,53	8,14	7,24

Meetopstelling inclusief Hoofdvorm en Valhelm (los op ondersteuning)

Massa: 3,39 kg

Theoretische kracht (zonder wrijving) : 33,22 N

	Top		Voor		Achter		Rechts		Links	
Valhoogte (m)	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0
Gemiddelde versnelling (m/s ²)	8,59	8,43	8,68	8,41	6,97	7,79	8,68	8,53	7,54	8,52
Kracht val (N)	29,09	28,54	29,39	28,48	23,60	26,38	29,39	28,88	25,53	28,85
Wrijvingskracht (N)	4,13	4,67	3,83	4,74	9,62	6,84	3,83	4,33	7,69	4,37

Bijlage 17: Gebruiksprotocol Meetopstelling valhelmen (OIM)

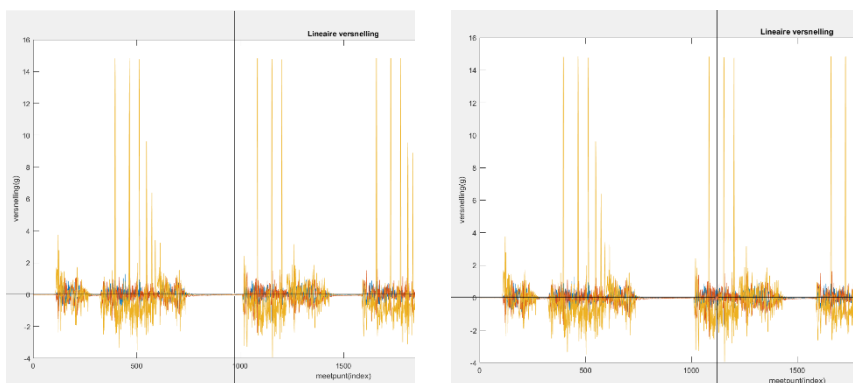
Benodigdheden:

- Meetopstelling (inclusief 4 schuine steunpinnen)
- IMU met bijbehorende router
- Tape
- Hoofdvorm
- Valhelm
- Laptop (met Matlab en Excel geïnstalleerd)



- 1) Controleer of alle benodigdheden aanwezig zijn op de testlocatie.
- 2) Controleer of de meetopstelling, met nadruk op de ondersteuning, intact is en klaar voor gebruik.
- 3) Geef de vijf zijden van het hoofd aan met behulp van de stift.
- 4) Markeer de 3 verschillende posities van de steunpinnen op de hoofdvorm/valhelm.
- 5) Meet vanaf het impactpunt de hoogte van 1.0m.
- 6) Geef de hoogte van 1.0m aan met een stuk tape rondom de palen, zodat de ondersteuning niet verder kan komen dan dit punt.
- 7) Positioneer de vier schuine steunpinnen 4 cm in de ondersteuning en zet ze vast met behulp van de boutjes.
- 8) Koppel de router aan de laptop en selecteer vervolgens het wifi-adres 'NGIMU' (zo kan de IMU draadloos metingen uitvoeren).
- 9) Start het programma NGIMU GUI op.
- 10) Druk op de aan/uit knop van de IMU.
- 11) Ga naar *Connection > Search for Connections* of druk op *F3* om te zoeken naar de IMU
- 12) Selecteer de gebruikte IMU (als het goed is er nu live data te zien op het terminal scherm)
- 13) Plaats de IMU met de aan/uit knop naar buiten in de hoofdvorm
- 14) Plaats de deksel in de uitsparing en duw daarmee de IMU tot op de bodem van de uitsparing.
- 15) Schroef de deksel vast, zodat de IMU niet meer kan bewegen.
- 16) Plaats de valhelm op de hoofdvorm.
- 17) Ga naar *Graphs > Accelerometer* om de grafieken van de lineaire versnellingen op het scherm te zien.
- 18) Controleer of de versnellingen correct op het scherm worden weergegeven, bij het verplaatsen van de hoofdvorm.
- 19) Plaats de hoofdvorm op de ondersteuning.
- 20) Positioneer de hoofdvorm zo dat de top van het hoofd de val zal opvangen en contact maakt met het impactpunt.

- 21) Start de meting van de IMU via de laptop (*Tools > Data Logger>Start*)
- 22) Trek de ondersteuning met hoofdvorm 0.5m de lucht in tot de ondersteuning niet meer verder kan door het stuk tape.
- 23) Laat de ondersteuning met hoofdvorm langs de geleider vallen.
- 24) Stop de opname via de Data Logger.
- 25) Sla de gemeten data van de IMU op onder een herkenbare naam (vb Valhelm1_Top_1).
- 26) Herhaal stappen 18 t/m 24 tweemaal.
- 27) Controleer of er 3 vallen/metingen hebben plaatsgevonden voor desbetreffende positie van het hoofd.
- 28) Herhaal stappen 18 t/m 26 voor de voorkant van de hoofdvorm. Hierbij worden de achterste (schuine) steunpinnen 3cm in de ondersteuning geplaatst. De voorste steunpinnen worden volledig in de ondersteuning gedruwd en maken geen contact met de hoofdvorm.
- 29) Herhaal stappen 18 t/m 26 voor de achterkant van de hoofdvorm. Hierbij worden de voorste (schuine) steunpinnen 3cm in de ondersteuning geplaatst. De achterste steunpinnen worden volledig in de ondersteuning gedruwd en maken geen contact met de hoofdvorm.
- 30) Controleer of er in totaal 9 vallen/metingen hebben plaatsgevonden.
- 31) Haal de valhelm los van de hoofdvorm.
- 32) Schroef de deksel van de uitsparing open en haal de IMU eruit.
- 33) Zet de IMU uit.
- 34) Koppel de router los van de laptop en sluit het NGIMU GUI programma.
- 35) Open in Matlab het script effectiviteit_valhelm_definitief en controleer of de volgende Matlab codes in dezelfde map aanwezig zijn: ImportNGIMU, bereken_val, HIC_vectorized en Positie_IMU_val.
- 36) Run hetscript.
- 37) Selecteer het .XML bestand van de val die je wilt analyseren.
(Het proces van .XML bestanden selecteren herhaald zich voor 9 vallen. Als er minder vallen geanalyseerd moeten worden de hoeveelheid vallen aangepast worden in het script bij de 'for-loop' of kan het script vroegtijdig stop gezet worden.)
- 38) Er komt een plot tevoorschijn waarbij de start en het einde van de val geselecteerd moet worden. Hierbij kan het begin van de val met een redelijke marge genomen worden (op de baseline) en het einde net na de grootste piek. Zie onderstaande figuren voor een visuele representatie.



- 39) Herhaal stappen 42 en 43 (achtmaal) voor de resterende vallen die je wilt analyseren
- 40) Er komen twee nieuwe figuren tevoorschijn voor de valsnelheid en de impactversnelling van alle geselecteerde vallen, waarbij je kunt nagaan of de vallen correct zijn gemeten en het vinden van eventuele uitschieters.

- 41) Sla deze plots op voor latere analyses.
- 42) De eindsnelheid, eindversnelling, impactversnelling, HIC en valtijd worden in matrixen geplaatst.
- 43) Deze uitkomstmaten kunnen binnen Matlab bekeken worden (klikken op de variabele in de workspace) en vervolgens handmatig verplaatst worden naar Excel of met behulp van het laatste stuk van het script geëxporteerd worden naar Excel.
- 44) Voor het exporteren, moet de naam van het Excel bestand, de naam van de sheet, de rij en kolom aangegeven worden in het script (zie afbeelding onderaan pagina).
- 45) Matlab maakt vervolgens een nieuw Excel bestand aan, met de opgegeven namen, waar de data naartoe wordt geëxporteerd.
- 46) De data kan nu gemakkelijk vergeleken worden met eerder verkregen data van andere valhelmen.

```

%% gegevens invullen in Excel bestand
% rij excelsheet
valnummer1 = 83;
valnummer2 = 96;
valnummer3 = 109;
valnummer4 = 122;
% omzetten rijnummers naar strings
valnummer_str1 = num2str(valnummer1);
valnummer_str2 = num2str(valnummer2);
valnummer_str3 = num2str(valnummer3);
valnummer_str4 = num2str(valnummer4);
% kolom koppelen met rijnummer
plek_tabel1 = ['B' valnummer_str1]; % kolom en rij in Excel
plek_tabel2 = ['B' valnummer_str2];
plek_tabel3 = ['B' valnummer_str3];
plek_tabel4 = ['B' valnummer_str4]; %I P W AD

% exporteren data z-as naar Excel
xlswrite('Onderzoek_Valhelmen_Definitief.xlsx',v_eind,'Valhelmen',plek_tabel1);
xlswrite('Onderzoek_Valhelmen_Definitief.xlsx',a_eind,'Valhelmen',plek_tabel2);
xlswrite('Onderzoek_Valhelmen_Definitief.xlsx',a_impact,'Valhelmen',plek_tabel3);
xlswrite('Onderzoek_Valhelmen_Definitief.xlsx',Valtijd,'Valhelmen',plek_tabel4);

```

Rijnummer

Kolom

Naam Excel bestand

Naam Sheet