

VALIDATIE KRACHTSVERDELING IN BRUGDEK MET CODA WAVE INTERFEROMETRY

Jorn Leijen



VALIDATIE KRACHTSVERDELING IN BRUGDEK MET CODA WAVE INTERFEROMETRY

**Afstudeeronderzoek in het kader van de afronding van de opleiding
Constructief Ontwerper BV/BmS**

**Door:
Jorn Leijen**

Mei 2022 te Breukelen

Afstudeerbegeleider BV/BmS: dr. ir. drs. R. Braam

VOORWOORD

Bijna 7 jaar geleden heb ik de keuze gemaakt om mijn werkgebied te verleggen van de praktische uitvoeringskant van de Civiele Techniek naar de ontwerpkant van dit mooie vak. Boskalis bood mij de mogelijkheid om deze stap te zetten en hiervoor de nodige bijscholing op te pakken. In 2015 ben ik in dat kader begonnen met de BSEng opleiding van BV/BmS. Aansluitend ben ik in 2016 begonnen met de MSEng opleiding. Ik kan zeggen dat dit met periodes een behoorlijk intensief traject is geweest. Dit afstudeeronderzoek luidt het einde in van mijn opleidingstraject tot Constructief Ontwerper.

Mijn afstudeeronderzoek heeft niet plaats kunnen vinden zonder de hulp van diverse personen die ik op deze plek daarvoor hartelijk wil bedanken.

In de eerste plaats mijn collega dr. ir. Herbert van der Ham die mij dit onderzoek heeft voorgesteld en op vele momenten, in weer en wind, bij nacht en ontij, heeft geholpen met het uitvoeren van de metingen. Grote dank ook voor de onmisbare constructieve feedback op mijn onderzoek en de aanmoediging om de voortgang in het werk te houden.

Dr. ir. Yuguang Yang van de TU Delft voor het delen van zijn kennis en expertise op het gebied van CWI en die er in de eerste plaats voor heeft gezorgd dat met het opschalen van zijn laboratoriumonderzoek dit afstudeeronderzoek mogelijk kon worden gemaakt.

Ir. Danny Fu, afstudeer kandidaat bij de TU Delft, voor het gesleep met de meetcomputer en aansluiten van de kabels tijdens het praktische deel van het onderzoek waarbij we samen optrokken. Een fijne samenwerking welke veel heeft geholpen bij de verdere uitwerking.

Daarbij ir. Fengqiao Zhang en Hao Cheng van de TU Delft. Beiden hebben groot geduld gehad met de uitleg van, en aanpassingen aan de benodigde Matlab-codes om de data goed te kunnen verwerken.

Van de Betonvereniging wil dr. ir. drs. René Braam bedanken die mij op gezette momenten weer aansporing en reflectie gaf om het rapport af te ronden.

Daarnaast wil ik Boskalis bedanken die mij de mogelijkheid heeft geboden om deze sprong te wagen, in het bijzonder Roel Schop, hoofd Ontwerpfdeling, en Wim Verloop, hoofd vakgroep Constructie.

Tot slot mijn familie. Grote dank en waardering voor mijn vrouw Elke, mijn zoon Jurre en mijn dochter Sophie voor de support en het geduld dat ze steeds weer moesten opbrengen tijdens de drukke momenten van het opleidingstraject. Er zijn heel wat weekenden geweest, ook weer met de afronding van dit rapport, dat ik mij opsloot in de studeerkamer en niet bereikbaar was. Veel liefde voor mijn ouders die mij altijd gesteund en aangemoedigd hebben om door te leren en mij hier de mogelijkheden voor hebben gegeven.

SAMENVATTING

Het gebruik van ultrasone golven voor betononderzoek is in de afgelopen jaren in ontwikkeling geraakt. Door het toepassen van een techniek genaamd Coda Wave Interferometry (CWI) op de meetdata van ultrasone golven door een betonnen proefstuk, kan een correlatie met het spanningsniveau in de constructie worden afgeleid. Bij deze techniek wordt gebruik gemaakt van het akoestoelastisch effect van een materiaal. Dit effect stelt dat de snelheid van de (ultrasone) golven door een materiaal afhankelijk is van het spanningsniveau in het materiaal waar de golven doorheen gaan. Met CWI wordt het verschil in de golfsnelheid van twee signalen bepaald, een meetsignaal ten opzichte van een eerder gemeten referentiesignaal. Bij deze vergelijking wordt in eerste instantie gekeken naar de staart ("coda") van de signalen. De staart van het signaal heeft ten gevolge van bijvoorbeeld heterogeniteiten en microscheuren diverse reflecties ondergaan en daarmee een langere weg door het materiaal afgelegd naar de ontvangende sensor dan het deel van het signaal dat een direct pad van zender naar ontvanger heeft afgelegd. Door deze langere weg is meer informatie over het materiaal af te leiden. Het verschil tussen het meetsignaal en het referentiesignaal wordt met een stretching-techniek bepaald. Met dit oprekken van het gemeten signaal wordt het signaal zo goed als mogelijk passend gemaakt op het referentiesignaal. De benodigde mate van het oprekken van het meetsignaal kan worden gecorreleerd aan het verschil in spanningsniveau tussen de meetmomenten. In divers laboratoriumonderzoek is dit onderzocht en vastgesteld. Een opschaling naar een werkelijke situatie is nog niet uitgevoerd. Een gefaseerd te bouwen brugdek in het door Boskalis uitgevoerde project "Nieuwe Verbinding N69" leent zich goed om dit onderzoek op te schalen. In dit brugdek zijn diverse wijzigingen in de krachtsverdeling verwacht ten gevolge van het gedurende de bouw wijzigen van het statisch systeem en ten gevolge van tijdsafhankelijke effecten. In dit onderzoek is gekeken of de theoretische krachtsverdeling gevalideerd kan worden met behulp van CWI. Op een viertal locaties in het brugdek zijn sensoren, Smart Aggregates, ingestort welke gedurende de bouw van de brug op vijf momenten zijn gemeten. De sensoren zijn zowel gebruikt als zender en als ontvanger van het ultrasonische signaal. Hiermee is per sensorgroep een dicht net aan meetdata verkregen. De resultaten van de metingen zijn grillig en laten een lagere betrouwbaarheid zien dan de resultaten van laboratoriumonderzoek. Er is gezocht naar een verklaring in enerzijds de waarden van de theoretische krachtsverdeling en anderzijds de invloedsfactoren op de metingen zelf. Onder andere het hydratatieproces van het beton heeft veel invloed op de metingen. Door de relatief grote tijd tussen de metingen ontstaat er een verstoord beeld van het referentiesignaal. Een kwantitatieve vergelijking met de theoretische spanningen is hierdoor niet mogelijk gebleken. Met inachtneming van de diverse invloedsfactoren is wel een globale overeenkomst gevonden tussen de wijzigingen van theoretische spanningsniveau en de ontwikkeling van de gemeten golfsnelheid.

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord.....	3
Samenvatting	4
Inhoudsopgave.....	5
Lijst Figuren.....	7
Lijst Tabellen	9
1 Inleiding	10
1.1 Aanleiding onderzoek.....	10
1.2 Probleemstelling.....	11
1.3 Doel van het onderzoek.....	11
1.4 Onderzoeksvraag	12
1.5 Onderzoeksopzet	12
1.6 Afbakening onderzoek.....	12
1.7 Leeswijzer	13
2 Theorie Coda Wave Interferometry.....	14
2.1 Achtergrond.....	14
2.2 Principe Coda Wave Interferometry (CWI).....	15
2.3 Stretching Techniek.....	18
2.4 Aankomst signaal – Hinkely criterium	20
2.5 Fast Fourier Transformatie	21
2.6 Tijdvenster.....	22
2.7 Correlatiecoëfficiënt.....	23
3 Praktijkmeting Brug beekdal Keersop.....	24
3.1 Inleiding.....	24
3.2 Voorbereiding	24
3.3 Uitvoering veldmetingen	34
4 Resultaten en analyse CWI KW09	36
4.1 Nabewerking data	36
4.2 Resultaten Laboratoriumonderzoek.....	38
4.3 Theoretisch spanningsniveau	42
4.4 Resultaten Coda Wave Interferometry Meetlocatie POS3	44
4.5 Analyse resultaten CWI	47

4.6	Beschouwing beïnvloeding metingen	48
5	Discussie.....	59
6	Beantwoording van de onderzoeksvragen.....	60
7	Beantwoording hoofdvraag, conclusies en aanbevelingen	62
8	Zelfreflectie.....	64
9	Bibliografie	65
	Bijlagen	66
	Bijlage A – Grafiek output Kist-analyse.....	67
	Bijlage B – Montagetekeningen sensoren.....	68
	Bijlage C – Logboeken metingen	69
	Bijlage D – Matlab codes.....	70
	Bijlage E – FFT-Analyse	71
	Bijlage F – Spanningsfiguren en -toestand	72
	Bijlage G – M-N-K-diagrammen.....	73
	Bijlage H – CWI resultaten meetlocatie POS3	74

LIJST FIGUREN

Figuur 1.1 Visualisaties Beekdalbruggen KW02 en KW09 [Bron: (Boskalis Nederland, NEXT, H+N+S, Mos Ecologisch Advies, 2019)]	10
Figuur 2.1 Principe ultrasonische transmissie [Bron: (Niederleithinger, Wang, Herbrand, & Müller, 2018)]	14
Figuur 2.2 Principe voortplanting golf [Bron: (Moore, Phares, & Washer, 2004)]	15
Figuur 2.3 Mate van verstrooiing in beton [Bron (Planès & Larose, 2013)]	16
Figuur 2.4 Voorbeeld ontvangen signaal [Bron: (Planès & Larose, 2013)]	17
Figuur 2.5 Principe doublet (L) en Stretching (R) [Bron: (Niederleithinger, Wang, Herbrand, & Müller, 2018)]	19
Figuur 2.6 Principe stretching signaal [Bron: (Kevinly C. , 2018)]	19
Figuur 2.7 Signaal	20
Figuur 2.8 Grafische weergave Hinkely-analyse door middel van formule [2.8] op signaal ID1689 ..	21
Figuur 2.9 Signaal ID1689, inclusief eerste aankomst (rood)	21
Figuur 2.10 Vormen van Fourier transformaties [Bron: (Smith, 1999)]	22
Figuur 3.1 Bovenaanzicht en langsdoorsnede KW9	25
Figuur 3.2 Constructie KW09	25
Figuur 3.3 Principe stortfasering	26
Figuur 3.4 Wijzigen krachtsverdeling gefaseerde bouw [Bron: dictaat Voorgespannen Beton (Galjaard, 2016)]	26
Figuur 3.5 Meetposities in relatie verschuiving krachtsverdeling.....	27
Figuur 3.6 Meetposities bovenaanzicht.....	28
Figuur 3.7 Maatvoering grids sensoren	28
Figuur 3.8 L: Smart Aggregate zoals toegepast. R: opbouw principe SA [Bron presentatie Dr. Ir. Y. Yang]	29
Figuur 3.9 Opstelling kalibratie sensoren	30
Figuur 3.10 Assemblage meetstokken.....	30
Figuur 3.11 Impressie montage meetstokken. L: Meetstok in wapeningsnet. R: Bekabeling naar toekomstige trekput in schampkant	31
Figuur 3.12 Schema meetsysteem	32
Figuur 3.13 Enkele componenten meetsysteem.....	33
Figuur 3.14 Cilinders en kubussen op bouwlocatie [L] en meetopzet laboratorium [R]	34
Figuur 3.15 Kanaalnummering MUX-boxen (CHx)	35
Figuur 4.1 Printscreen ontvangen meetdata	36
Figuur 4.2 Principe rolling reference [Bron: (Fu, 2022)]	37
Figuur 4.3 Voorbeeld verticale verschuiving signaal.....	37
Figuur 4.4 "Cycle Skipping" signaal (L) en afwijkende golfvorm van de signalen (R)	38
Figuur 4.5 Hydratatatie-dv/v ontwikkeling cilinders laboratorium.....	39
Figuur 4.6 CWI Cilinder 1 [L] en Cilinder 2 [R]. [Data verwerkt door (Fu, 2022)]	40

Figuur 4.7 Resultaten cumulatieve [L] en relatieve [R] dv/v belastingproef cilinders [(data verwerkt door (Fu, 2022))]	41
Figuur 4.8 Verschilspanningen POS3	43
Figuur 4.9 CWI van de metingen	44
Figuur 4.10 Detailweergave tijdvenster	44
Figuur 4.11 Positie 3 - schema sensoren met CH-Id [Boven]. Schema uitgevoerde CWI POS 3 [Onder]	45
Figuur 4.12 Polystempel	49
Figuur 4.13 Principe dwars- [B] en langsdoorsnede [O] ondersteuning dekconstructie	49
Figuur 4.14 Veermodel Parallelsysteem	50
Figuur 4.15 Veermodel seriesysteem	51
Figuur 4.16 Verschilspanningen inclusief invloed ondersteuning	51
Figuur 4.17 Spanningen POS3, meting 2	53
Figuur 4.18 Spanningstoestand POS3, meting 2	54
Figuur 4.19 Niet-ideale omstandigheden meting 3	57

LIJST TABELLEN

Tabel 3.1 Onderdelen meetsysteem.....	32
Tabel 3.2 Meetmomenten.....	33
Tabel 4.1 Belastingstappen van de 2 cycli cilindertest.....	39
Tabel 4.2 Resultaten kubussen.....	41
Tabel 4.3 Spanningen meetposities.....	42
Tabel 4.4 Verschilspanningen POS3.....	43
Tabel 4.5 Positie 3, CWI bovenzijde, Tijdvenster 1	46
Tabel 4.6 Positie 3, CWI bovenzijde, Tijdvenster 2	46
Tabel 4.7 Positie 3, CWI onderzijde, Tijdvenster 1.....	46
Tabel 4.8 Positie 3, CWI onderzijde, Tijdvenster 2.....	46
Tabel 4.9 Veerwaarde stempel ondersteuning.....	50
Tabel 4.10 Resume krachtsverdeling positie 3	52
Tabel 4.11 Spanningstoestand meetlocatie POS3	54
Tabel 4.12 Resume M-N-Kappa	56
Tabel 4.13 Omstandigheden metingen	57

1 INLEIDING

1.1 Aanleiding onderzoek

Binnen het door Boskalis uitgevoerde project Nieuwe Verbinding N69 ben ik betrokken geweest als constructeur van de twee zogeheten Beekdalbruggen. De Beekdalbruggen overspannen het beekdal van de rivier Run ("Kunstwerk 2") en het beekdal van de rivier Keersop ("Kunstwerk 9"). De bruggen overspannen niet alleen de betreffende watergangen maar zorgen ook voor een hooggelegen kruising met het omliggende gebied van de beken waardoor de natuurlijke corridor behouden blijft. De brug over de Run omvat hiermee 8 overspanningen en de brug over de Keersop omvat 10 overspanningen van elk 31.25 m. De bruggen zijn verder nagenoeg identiek. Als constructeur van de bovenbouw heb ik de berekeningen uitgevoerd van de dekconstructie van de bruggen ten behoeve van het Voorontwerp, het Definitief Ontwerp en het Uitvoeringsontwerp.



Figuur 1.1 Visualisaties Beekdalbruggen KW02 en KW09 [Bron: (Boskalis Nederland, NEXT, H+N+S, Mos Ecologisch Advies, 2019)]

De bovenbouw van deze Beekdalbruggen is uitgevoerd als een in-situ te storten, gewapende en nagespannen betonconstructie. De dekken van beide bruggen worden uitgevoerd als één doorgaande, statisch onbepaalde, dekconstructie, welke echter gefaseerd worden gebouwd. Ten gevolge van het gefaseerd bouwen en voorspannen, ondergaat de constructie diverse wijzigingen van het statisch systeem. Tevens moet ten gevolge van het krimpen en kruipen van de betonconstructie rekening worden gehouden met het wijzigen van de krachtsverdeling in de tijd (het Kist-effect). Het in kaart en in rekening brengen van deze optredende effecten is een complexe analyse. Alle bouwfasen en belastingstappen hebben interactie met elkaar. Deze analyses zijn door mij onderzocht en inzichtelijk gemaakt in de DO-berekeningen van het ontwerpproces.

De resultaten van deze in kaart gebrachte effecten hebben de basis gevormd voor het uitgevoerde praktische onderzoek van de dekconstructie gedurende de bouw van de brug. Dit onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met de TU Delft. Binnen de TU Delft loopt een onderzoek aangaande Smart Aggregates, sensoren, welke in een betonnen constructie worden ingestort. Met behulp van deze sensoren wordt meetdata verkregen waar met een analyse door middel van Coda Wave Interferometry (CWI) (indirect) de aanwezige spanning in de betonconstructie kan worden bepaald. Deze Smart Aggregates zijn tot nog toe hoofdzakelijk beproefd in het laboratorium. De wens was om met de Smart Aggregates een relevante praktijkcase uit te voeren. De bovenbouw van de Beekdalbrug Keersop leent zich per uitstek voor deze praktijkcase gezien de interessante wijzigingen in de krachtsverdeling ten gevolge van het gefaseerd bouwen.

Naast het ten uitvoer brengen van de gewenste praktijkcase, maakt de maatschappelijke relevantie op het gebied van duurzaamheid dat dit onderzoek ook in de nabije toekomst van grote toegevoegde waarde zal zijn. Het verkrijgen van deze data geeft namelijk inzicht in het spanningsniveau in een constructie op elk gewenst tijdstip. Dit kan uiteindelijk mogelijk meehelpen in het analyseren van bijvoorbeeld de (rest)levensduur van een constructie ten aanzien van vermoeiing. Hiermee kan dan weer een gerichtere aanpak worden gekozen op het gebied van herbouw danwel renovatie.

Dit onderzoek heeft bijgedragen aan de praktijkkennis van de werking van het aangebrachte systeem en de bruikbaarheid en verwerking van verkregen data.

1.2 Probleemstelling

Er is geen expliciete validatie van het werkelijke spanningsniveau in een (beton)constructie. Bij de berekeningen aan de krachtsverdeling in een constructie wordt voornamelijk gebruik gemaakt van theoretische rekenmodellen op basis van de mechanica en het materiaalgedrag. De spanningen ten gevolge van bijvoorbeeld kisteffecten, kruipgedrag en (verkeers)belastingen met het oog op vermoeiing berusten op deze theoretische modellen. Inzicht krijgen in de werkelijk optredende spanningen kan in diverse situaties interessant zijn voor gerichte analyses naar de (kwaliteit) van de constructie.

Het uitvoeren van een analyse van de krachtsverdeling in een constructie met behulp van CWI is een manier om de daadwerkelijk aanwezige spanningen op een gekozen locatie in een constructie te meten en visueel te maken.

1.3 Doel van het onderzoek

Het doel van het onderzoek omvat:

1. Opschaling van laboratoriumonderzoek naar praktijkonderzoek
2. Wijzigingen in de krachtsverdeling in de dekconstructie van KW9 ten gevolge van het wijzigen van het Statisch Systeem en het Kist-effect zichtbaar maken middels CWI waarbij een correlatie is te leggen met de ontwerpberekeningen.

1.4 Onderzoeksvraag

Aan de hand van de probleemstelling en de doelstelling is de volgende onderzoeksvraag geformuleerd:

- *Is het in een praktijksituatie mogelijk om middels het uitvoeren van Coda Wave Interferometry de krachtsverdeling en wijzigingen hierin in een betonconstructie te valideren?*

Deze hoofdvraag wordt met behulp de volgende deelvragen onderzocht:

- a. Wat is Coda Wave Interferometry?
- b. Wat is er nodig voor het opschalen van het laboratoriumonderzoek naar praktijkonderzoek?
- c. Welke krachtsverdeling willen we valideren?
- d. Welke posities voor het aanbrengen van de sensoren zijn het meest geschikt waarbij relevante en interessante data kan worden verkregen?
- e. Zijn de resultaten vanuit de Coda Wave Interferometry na analyse betrouwbaar?
- f. Is Coda Wave Interferometry een geschikte methode om de krachtsverdeling te valideren?
- g. Is er een kwantitatieve relatie te vinden tussen de resultaten van de Coda Wave Interferometry en de theoretische spanningsniveaus in de betreffende fases?
- h. Is het meetsysteem robuust genoeg om gedurende de bouwphase en gebruiksfase voor langere tijd te gebruiken?

1.5 Onderzoeksopzet

Het onderzoek richt zich op het tot stand komen van de praktische metingen en een analyse van een deel van de verkregen meetdata waarbij wordt gekeken of de resultaten uit de ontwerpberekening en de sensordata aan elkaar te relateren zijn.

Het onderzoek omvat de volgende onderdelen:

- Literatuuronderzoek naar de werking van CWI;
- Opstellen meetplan;
- Praktische voorbereiding en realisatie van de meetopstellingen;
- Uitvoeren diverse metingen op verschillende tijdstippen gedurende de bouw;
- Nabewerking verkregen data;
- Analyse data;
- Correleren van de data aan de theoretische spanningsniveaus.

1.6 Afbakening onderzoek

Het onderzoek heeft als doel gehad om tot een praktische opschaling te komen van het laboratoriumonderzoek van de TU Delft. Op de gedurende het ontwerpproces gerealiseerde constructieve berekeningen aan de brugconstructie (Boskalis Nederland, 2019) wordt daarom in dit rapport daar waar nodig slechts beperkt ingegaan

Er is gebruik gemaakt van meetapparatuur welke ter beschikking is gesteld door de TU Delft. Ten behoeve van de post-processing en analyse van de meetdata is gebruik gemaakt van de beschikbare kennis, methodes en algoritmen voor data processing van de TU Delft. Begrip over de werking hiervan is toegelicht.

De metingen opgenomen in dit rapport zijn uitgevoerd vanaf de stort van de 1^e bouwfase tot het moment van ontkisten van de aansluitende stortfasering. Hiermee beperkt het onderzoek zich dus tot het wijzigen van het statisch systeem en niet zo zeer in de optredende Kist-effecten ten gevolge van het kruipgedrag over een langere periode. Analyses zijn in het kader van dit onderzoek uitgevoerd voor 1 specifieke meetpositie. Gekozen is voor meetlocatie POS3 aangezien hier de grootste sprongen in de krachtsverdeling te verwachten waren gedurende de gemonitoorde periode.

1.7 Leeswijzer

Het rapport is opgedeeld in vier delen

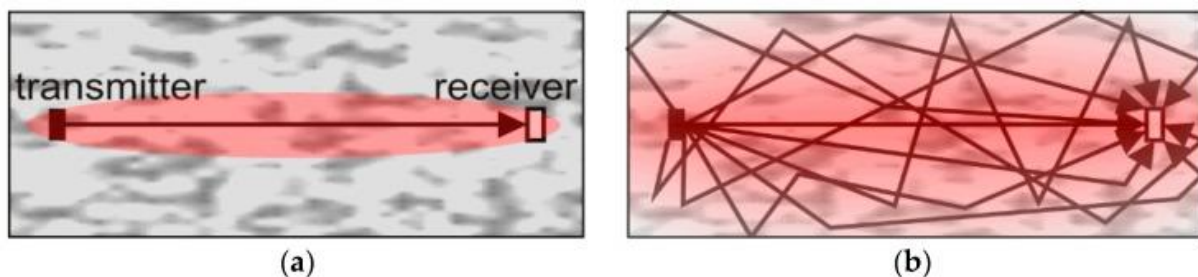
- | | |
|----------------|--|
| Hoofdstuk 2: | Principe werking Coda Wave Interferometry
<i>Toelichting van de belangrijkste begrippen aan de hand van literatuurstudie</i> |
| Hoofdstuk 3: | Voorbereiding en uitvoering metingen
<i>Toelichting op de voorbereidingen van het praktische deel van het onderzoek. Hier is tevens de relatie gelegd met de theoretisch berekende krachtsverdeling</i> |
| Hoofdstuk 4: | Resultaten en analyse van de metingen
<i>Beschouwing van de resultaten waarbij mogelijke oorzaken van afwijkingen nader is onderzocht.</i> |
| Hoofdstuk 5&6: | Discussie en conclusies met aanbevelingen. |

2 THEORIE CODA WAVE INTERFEROMETRY

De kern van dit onderzoek is het uitvoeren van metingen aan een betonconstructie met ultrasonische signalen. Voor begrip van de werking van deze techniek en het nabewerken van de verkregen meetdata is (literatuur)onderzoek gedaan. In dit hoofdstuk zijn de belangrijkste elementen toegelicht welke voor het begrip van de werking van Coda Wave Interferometry van belang zijn.

2.1 Achtergrond

Het uitvoeren van betononderzoek met behulp van ultrasonische golven wordt al langere tijd toegepast, voornamelijk op een laboratorium-schaal. Veel van dit onderzoek is gebaseerd op het principe van de Time of Flight (doorlooptijd) van de golf in relatie tot de dichtheid van het materiaal. Bij deze methode wordt gebruik gemaakt van de tijd welke benodigd is voor de golf om de afstand af te leggen van de zender tot de ontvanger ("snelheid = afstand / tijd"). De methode is met name geschikt bij homogene materialen waarbij een recht, direct, pad kan worden afgelegd tussen de zender en de ontvanger. Beton is echter een heterogeen materiaal. Het ultrasonische signaal wordt hierdoor vanaf de zender verstoord langs de af te leggen route naar de ontvanger. Dit wordt verstrooiing genoemd. In Figuur 2.1 is dit principe weergegeven.



Figuur 2.1 Principe ultrasonische transmissie [Bron: (Niederleithinger, Wang, Herbrand, & Müller, 2018)]

In Figuur 2.1 is het volgende weergegeven:

- a) directe pad van de golf van zender naar ontvanger
- b) meervoudige scattering, verstrooiing

Door deze verstoringen is de Time of Flight-methode beperkt voor het gebruik in heterogene materialen omdat bij deze methode juist wordt uitgegaan van een directe route. Ook de eerste aankomst van het signaal heeft reeds een zekere mate van verstrooiing waardoor er geen sprake is van een directe route. Om verstoring te voorkomen moet er gebruik worden gemaakt van signalen met een grotere golflengte waarbij verstrooiing van het signaal wordt beperkt, maar waarmee ook informatie verloren gaat. Dit wordt nader toegelicht in par. 2.2.

Recenter onderzoek heeft inzicht gegeven in het toepassen van een andere methode met ultrasonische golven genaamd Coda Wave Interferometry. Deze techniek is afkomstig uit de geotechniek en seismologie. Bij deze techniek wordt juist wel gebruik gemaakt van het verstrooien van het signaal. Door de verstrooiing wordt door het signaal een langer (tijds)pad

afgelegd zoals is weergegeven in Figuur 2.1. Bij wijziging van het materiaal (bijvoorbeeld door belasting) zal het signaal op een andere wijze worden verstrooid en zal het een ander pad afleggen. Door het vergelijken van meetsignalen op verschillende tijdstippen, kunnen kleine wijzigingen in het materiaal zichtbaar worden gemaakt.

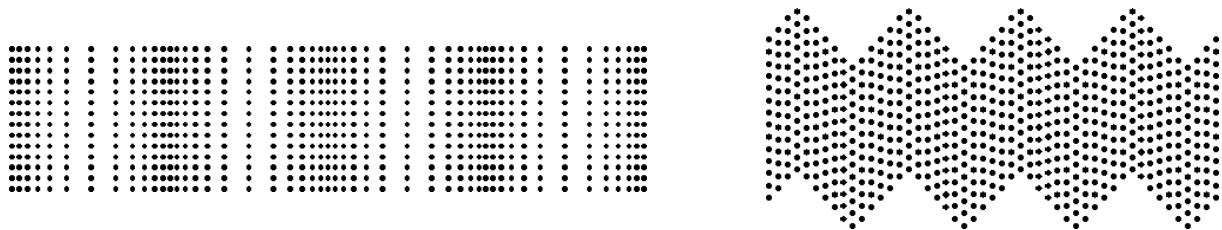
2.2 Principe Coda Wave Interferometry (CWI)

Bij ultrasonisch onderzoek wordt gebruik gemaakt van signalen, trillingen, welke door een constructie worden gestuurd. De trilling plant zich met een bepaalde snelheid door het materiaal voort, waarbij de route van de trilling door het materiaal wordt bepaald door bijvoorbeeld de heterogeniteit van het materiaal. Een bekend voorbeeld van betononderzoek binnen de civiele betonconstructies door middel van trillingen betreft het doormeten van prefab heipalen middels de hamertje tik methode. Hier wordt geen gebruik gemaakt van ultrasone signalen, maar wordt door met een hamer op de paal te slaan een trilling in de paal gebracht. Ook deze trilling heeft een voortplantingssnelheid en golflengte waarmee in de paal op basis van de reflecties van het signaal onvolkomenheden kunnen worden gedetecteerd.

De wijze waarop een ultrasone golf zich door een constructie voortplant, wordt in twee type golven onderscheiden: P-golven en S-golven. Het onderscheid heeft te maken met de richting van de trilling in relatie tot de voortplantingsrichting van de golf. In Figuur 2.2 is dit principe weergegeven.

Links: P-golven. Trillingen evenwijdig aan de voortplantingsrichting

Rechts: S-golven. Trillingen haaks op de voortplantingsrichting.



Figuur 2.2 Principe voortplanting golf [Bron: (Moore, Phares, & Washer, 2004)]

De snelheid van deze golven is als functie uit te schrijven [uit rapport van (Kevinly C. , 2018)]:

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)\rho}} \quad [2.1]$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E_d}{2\rho(1+\nu)}} \quad [2.2]$$

Hierin is:

E_d = Dynamische Elasticiteitsmodulus [N/mm²]

ν = Poissongetal [-]

ρ = dichtheid [kg/m³]

De golfsnelheid is dus afhankelijk van de elasticiteitsmodulus, het Poissongetal en de dichtheid van het materiaal. In de formules wordt de dynamische elasticiteitsmodulus gebruikt. De relatie met de statische elasticiteitsmodulus bedraagt:

$$E_c = 0.83 \cdot E_d \quad [2.3]$$

Hierin is:

E_c = statische Elasticiteitsmodulus [N/mm²]

E_d = dynamische Elasticiteitsmodulus [N/mm²]

Uit onderzoek (Planès & Larose, 2013) blijkt dat de snelheid van P-golven in beton ca. 4300 m/s bedraagt en die van S-golven ca. 2500 m/s. De golven verplaatsen zich door de constructie en worden hierbij gedeeltelijk gereflecteerd en afgebogen afhankelijk van de aard en de samenstelling van het materiaal, de heterogeniteit, de poriën en (micro-)scheuren. Dit veroorzaakt de eerder genoemde verstrooiing van het signaal. De mate waarin het signaal in de constructie wordt verstrooid, is afhankelijk van de heterogeniteit van het materiaal en de toegepaste frequentie van het signaal. Om kleine verstoringen in de constructie te kunnen meten is het van belang dat de frequentie groot genoeg is om door de heterogeniteiten van het materiaal weerkaatst en afgebogen te worden.

De golflengte van het signaal is gerelateerd aan de frequentie en de golfsnelheid:

$$\lambda = V / f \quad [2.4]$$

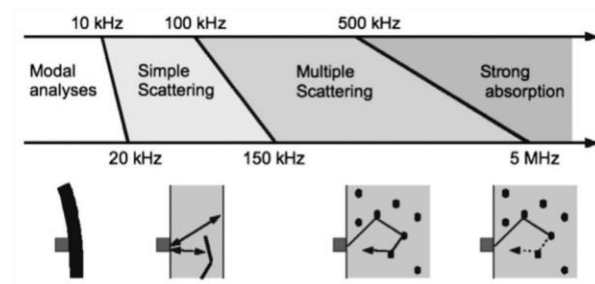
Hierin is:

λ = de golflengte [m]

V = de golfsnelheid [m/s]

f = de frequentie [Hz].

Een grotere frequentie resulteert bij dezelfde golfsnelheid in een kortere golflengte. Signalen met kortere golflengtes zullen meer interactie hebben met in de constructie aanwezige onvolkomenheden voordat de trilling de ontvangende sensor bereikt. Met kortere golflengtes kan daarom meer informatie worden verzameld waarmee nauwkeurigere resultaten worden verkregen. Hiertoe is onderzoek gedaan (Planès & Larose, 2013). Er zijn vier frequentiegebieden vastgesteld in relatie tot de verstrooiing van het signaal. Deze zijn in Figuur 2.3 weergegeven.

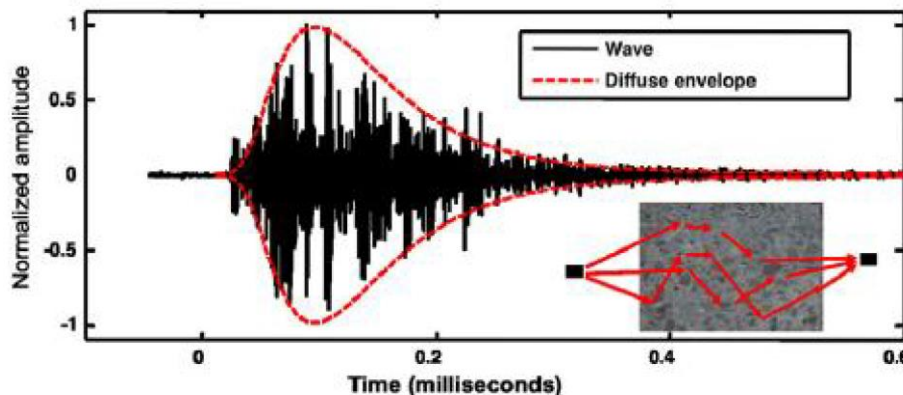


Figuur 2.3 Mate van verstrooiing in beton [Bron (Planès & Larose, 2013)]

Naast het feit dat een signaal met een kortere golflengte meer interactie heeft met de heterogeniteit van het materiaal, ontstaat ook meer demping van de signaalsterkte (amplitude).

Uit het onderzoek blijkt een frequentie tussen de 20 kHz en 150 kHz voor ultrasoon betononderzoek een goede nauwkeurigheid te geven. Deze bandbreedte komt terug in de diverse standaarden voor betononderzoek. Binnen deze bandbreedte wordt een optimum beschouwd tussen de mate van verstrooiing in relatie tot demping van het signaal. Bij frequenties onder de 20kHz is de golflengte groter dan de macroscopische structuur van het materiaal en geeft hierbij dus een lagere nauwkeurigheid. Bij golflengtes welke kleiner zijn dan de grootte van heterogeniteiten (gebied 3) ontstaan meer botsingen voordat het signaal de ontvanger bereikt. Dit geeft veel ruis in het signaal. Toch volgt uit onderzoek (Planès & Larose, 2013) dat de staart (Coda) van zo'n signaal bij de juiste verwerking veel informatie kan bevatten. Bij signalen boven de 1 MHz ontstaat dusdanig veel verstrooiingsdemping en demping van het signaal zelf, dat dit veel effect heeft op de resultaten.

De signalen welke later bij de ontvanger zijn aangekomen (de staart, "Coda", van het ontvangen signaal) hebben dus de langste route afgelegd door de constructie en hebben daarmee ook de meeste informatie verzameld op hun weg, maar zijn ook verzwakt in signaalsterkte. In Figuur 2.4 is een voorbeeld te zien hoe het signaal bij de ontvanger wordt ontvangen. Te zien is dat sterkte (amplitude) van het signaal afneemt bij de latere aankomst van het signaal. Dit is de coda van het signaal.



Figuur 2.4 Voorbeeld ontvangen signaal [Bron: (Planès & Larose, 2013)]

Door de langer afgelegde route kunnen de later ontvangen signalen mogelijk kleine wijzigingen detecteren welke de "first arrivals" niet hebben gedetecteerd. CWI is het meten van deze verstoringen. Met deze techniek wordt de verstoring van een signaal ten opzichte van een oorspronkelijk referentiesignaal gemeten. Het signaal kan hierbij als vingerafdruk worden gezien van dit meetgebied. Bij de CWI wordt de referentie vingerafdruk vergeleken met een nieuwe vingerafdruk van deze locatie. Hierbij wordt de verandering van de golfsnelheid door het materiaal gemeten. Bij compressie, toename van druk in het materiaal, ontstaat een toename van de golfsnelheid, bij een relatieve trek in het materiaal ontstaat een afname van de golfsnelheid.

Om de relatie tussen de verandering in de golfsnelheid met een bepaald spanningsniveau te leggen, wordt gebruik gemaakt van het zogeheten akoestoelastisch effect. Dit effect stelt dat de snelheid van de P-golven en S-golven in een materiaal, in dit geval beton, verandert bij wijziging van de spanning in het materiaal. Het effect is gebaseerd op de constitutieve relatie volgens de wet van Hooke.

In uitgebreide vorm is de wet te schrijven als:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1-\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu \\ \nu & 1-\nu & \nu \\ \nu & \nu & 1-\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad [2.5]$$

Hierin is:

σ_{11} en ε_{11} de hoofdspanning [N/mm²] respectievelijk hoofdrek [-] in x-richting

σ_{22} en ε_{22} de hoofdspanning [N/mm²] respectievelijk hoofdrek [-] in y-richting

σ_{33} en ε_{33} de hoofdspanning [N/mm²] respectievelijk hoofdrek [-] in z-richting

E = Elasticiteitsmodulus [N/mm²]

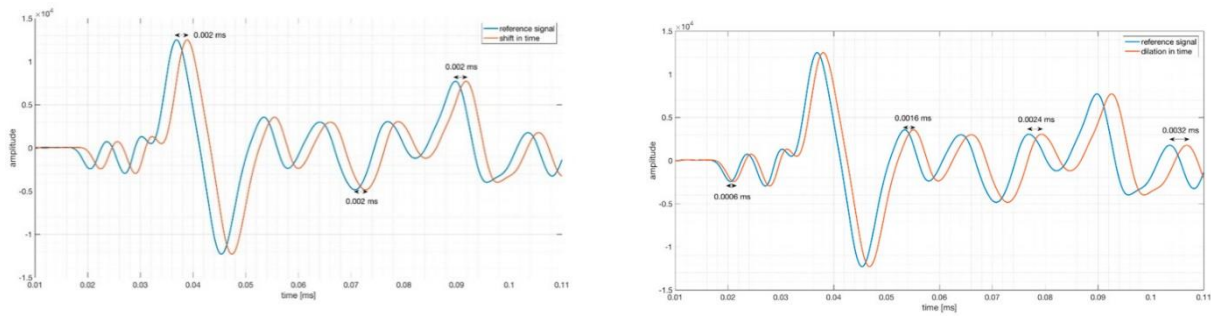
ν = Poissongetal [-]

De wet omschrijft een rechtlijnig, oneindig, verband tussen kracht en vervorming. Dit lineaire verband geldt bij kleine vervormingen. Murnaghan heeft in een artikel (Murnaghan, 1937) deze lineair elastische theorie uitgebreid met een niet-lineaire relatie tussen de spanning en de golfsnelheid in een materiaal.

In dit onderzoek is deze relatie niet zozeer kwantitatief gebruikt, maar CWI is wel gestoeld op het principe dat er een verband is tussen de spanning en de golfsnelheid in het materiaal en daarmee de verandering van de golfsnelheid bij wijziging van het spanningsniveau.

2.3 Stretching Techniek

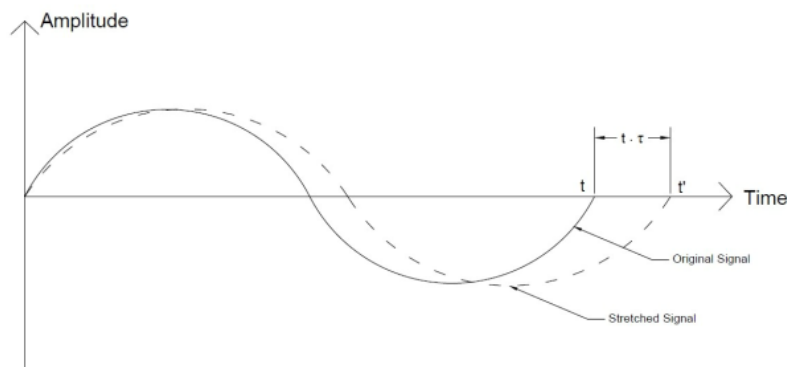
Het vinden van het verschil van de golfsnelheid van het nieuw gemeten signaal met de golfsnelheid van het referentie signaal wordt uitgevoerd met een zogeheten Stretching Techniek. Hierbij wordt het verschoven signaal dusdanig opgerekt ("stretchen") dat het zo goed als mogelijk overeenkomt met het referentiesignaal. Om de mate van het oprekken van het signaal te bepalen zijn verschillende methodes beschikbaar. Hiernavolgend zijn de doublet methode en de stretching-methode toegelicht. Bij de doublet-methode wordt uitgegaan van een constante verschuiving van het signaal over een bepaalde tijdslengete. Bij de stretching-methode wordt ervan uitgegaan dat de verschuiving over het tijdspad toeneemt.



Figuur 2.5 Principe doublet (L) en Stretching (R) [Bron: (Niederleithinger, Wang, Herbrand, & Müller, 2018)]

In het voorliggend onderzoek is gebruik gemaakt van de doublet-methode. Door CWI toe te passen over een beperkt deel van het signaal wordt benaderd dat de verschuiving constant is.

Bij de kleine snelheidsveranderingen die in het onderzoek van toepassing zijn, is een lineair verband aangenomen tussen de tijd “t” en de golfsnelheid “v”. Binnen een zeker tijdvenster wordt het tijdspad van het signaal van de belaste situatie gerekend tot het zo goed als mogelijk overeenkomt met het referentiesignaal. Een toename van de doorlooptijd betekent dus een afname van de golfsnelheid.



Figuur 2.6 Principe stretching signaal [Bron: (Kevinly C. , 2018)]

Er geldt dus:

$$\varepsilon = \frac{\Delta t}{t} = \frac{dv}{v+dv} \quad [2.6]$$

Aangezien we meten met hele kleine verschillen geldt:

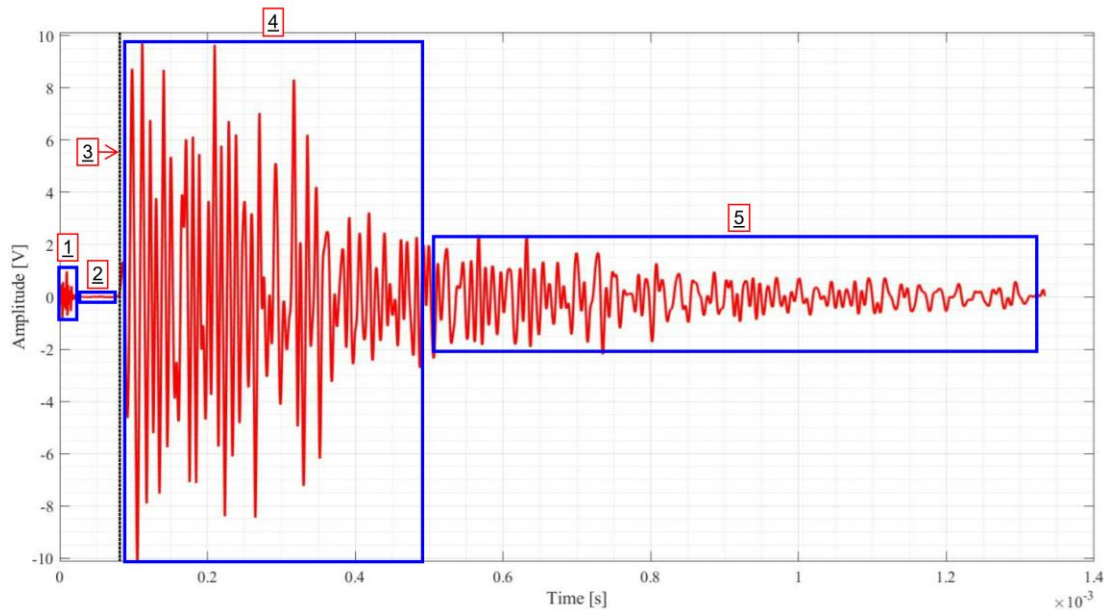
$$\varepsilon = \frac{\Delta t}{t} = \frac{dv}{v} \quad [2.7]$$

Een positieve ε betekent dat het signaal is ingedrukt en dus eerder is aangekomen bij de ontvanger. Een negatieve ε betekent dat het signaal is uitgerekt, het signaal is later aangekomen bij de ontvanger. Bij het uitvoeren van de CWI wordt als resultaat gezocht naar

deze dv/v . Een positieve dv/v wordt hiermee gerelateerd aan een toename van het spanningsniveau (relatieve druk) in de constructie. Een negatieve dv/v met een afname van het spanningsniveau (relatieve trek) in de constructie.

2.4 Aankomst signaal – Hinkely criterium

Het signaal dat wordt ontvangen, heeft een over het algemeen herkenbare vorm waarin grofweg steeds 5 elementen zijn te herkennen.



Figuur 2.7 Signaal

1. Ingangsruijs start signaal.
2. Reistijd signaal tot first arrival.
3. “First Arrival”: eerste aankomst van het signaal bij de passieve, ontvangende, sensor.
4. Deel van het signaal welke een directere route heeft afgelegd naar de passieve sensor.
5. “Coda” deel van het signaal.

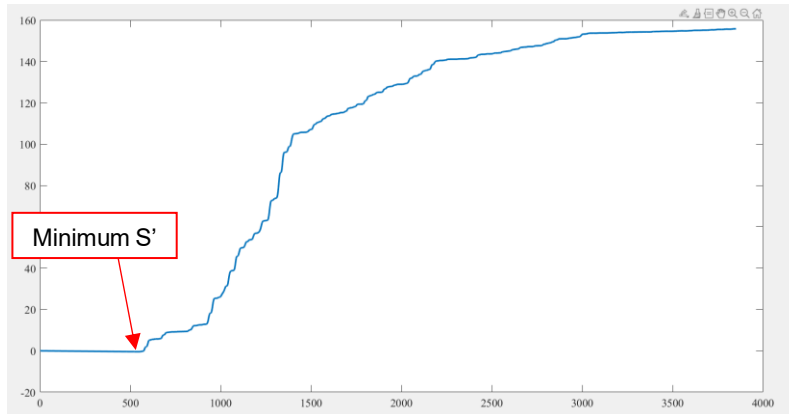
Voor het uitvoeren van de CWI is het voor de nabewerking van de data van belang dat de aankomst van het signaal goed wordt herkend. Voor de eerste aankomst bestaat het signaal uit ruis wat niet bruikbaar is. Om de eerste aankomst te bepalen wordt in de postprocessing, de nabewerking, gebruik gemaakt van het Hinkley -criterium dat is gebaseerd op de verwerkte deelenergie van het signaal zoals is weergegeven in formule [2.8].

$$S'_i = \sum_{k=1}^i R_k^2 - i \frac{S_N}{\alpha N} \quad [2.8]$$

Hierin is:

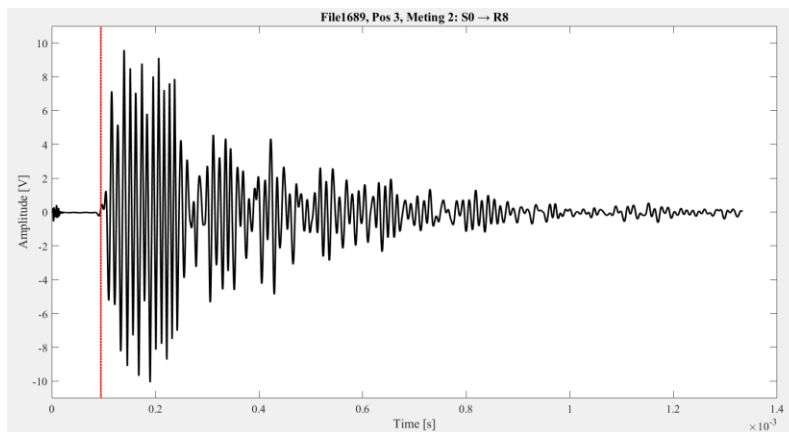
- R_k = is de grootte van het signaal op tijdstip k
- S_N = de som van de totale energie van het signaal
- N = het aantal metingen binnen het signaal
- α = factor = 50 [-]

De aankomst betreft het minimum van de verwerkte gedeeltelijke energie S' . In Figuur 2.8 is dit visueel weergegeven en te zien is dat de uitkomst van formule [2.8] eerst iets afneemt en vervolgens toeneemt.



Figuur 2.8 Grafische weergave Hinkely-analyse door middel van formule [2.8] op signaal ID1689

Dit punt wordt met behulp van de dataverwerking gevonden en voor alle datasignalen bepaald. In Figuur 2.9 is van hetzelfde signaal dit gevonden minimum uitgezet in de tijdsschaal en geprojecteerd in het betreffende signaal.



Figuur 2.9 Signaal ID1689, inclusief eerste aankomst (rood)

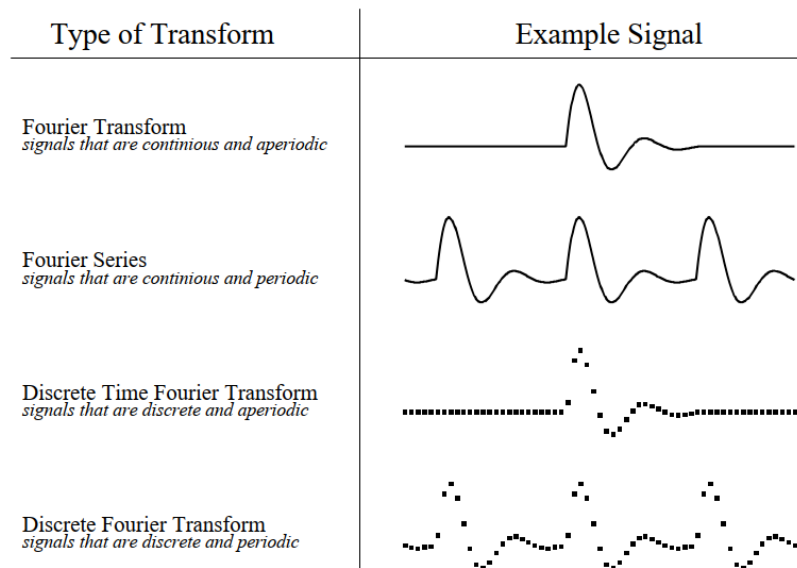
2.5 Fast Fourier Transformatie

Voor de nabewerking van de data is als eerste een analyse benodigd van de ontvangen signalen. De ontvangen signalen omvatten gegevens van de sterkte van het signaal (amplitude) uitgezet tegen de afgelegde tijd, het tijd-domein. Bij een Fourier analyse wordt een signaal ontleed in verschillende sinusoïdes. De sommatie van deze sinusoïdes geeft het oorspronkelijke signaal. Met een Fast-Fourier Transformatie (FFT-analyse) wordt het signaal in het tijd-domein omgezet naar het frequentie-domein. In een frequentie-domein wordt het spectrum weergegeven van de frequentie(s) welke binnen het signaal aanwezig zijn en hoe dominant de frequenties zijn.

Binnen de Fourier Transformaties wordt onderscheid gemaakt in [uit: (Smith, 1999)]:

Fourier Transform:	Aperiodiek , continue signaal
Fourier Series:	Periodiek, continue signaal
Discrete Time Fourier Transform:	Aperiodiek, discreet signal
Discrete Fourier Transform:	Periodiek, discreet signaal

De verschillende vormen zijn in Figuur 2.10 weergegeven.



Figuur 2.10 Vormen van Fourier transformaties [Bron: (Smith, 1999)]

We hebben te maken met een discreet, aperiodiek signaal. Discreet wil zeggen niet continue. Het signaal is in tijdstappen (pulsen) digitaal opgenomen en het signaal heeft een niet regelmatig patroon. De Discrete Time Fourier Transform (DTFT) is echter niet in een algoritme te programmeren. DTFT vergt namelijk een oneindig aantal sinusoides. Voor gedigitaliseerde signalen wordt daarom gebruik gemaakt van de Discrete Fourier Transform (DFT). Aperiodieke signalen worden dan periodiek gemaakt door het signaal te kopiëren. Een snelle, relatief eenvoudig programmeerbare, methode van DFT is de Fast Fourier Transform. De FFT is in het nabewerkingsprogramma Matlab een standaard functie. In de nabewerking is een FFT-analyse uitgevoerd om de dominante frequenties van de signalen te onderzoeken.

2.6 Tijdvenster

Het vergelijken van de signalen wordt dus middels een stretching techniek uitgevoerd. In het vervolg van de nabewerking wordt de dominante frequentie gebruikt voor het bepalen van het gebied waarover de CWI wordt toegepast, het tijdvenster. Voor een accurate CWI wordt een tijdvenster gebruikt van ca. 10 periodes van het signaal. Bij toepassing van een te groot tijdvenster ontstaat mogelijk het probleem dat het uitgangspunt van de doublet-methode waarbij de verschuiving constant is over het te stretchen tijdspad niet meer op het te stretchen gebied van toepassing is. Een te klein venster geeft mogelijk te weinig informatie voor een accurate CWI.

De periode van een trilling is gedefinieerd als:

$$P = \frac{1}{f} \quad [2.9]$$

Hierin is:

P = periode [s]

f = frequentie [Hz]

In de nabewerking worden deze 10 periodes berekend over het tijddomein op basis van de dominante frequentie. Gebleken is dat de signalen een dominante frequentie hebben tussen grofweg ca. 50 Hz. en 80 Hz. In de nabewerking is uiteindelijk voor dit onderzoek 50 Hz aangehouden. Dit geeft een groter tijdbereik waardoor meer periodes van de trilling worden meegenomen per venster. In de nabewerking van de data van de brug is dit een werkbare afweging gebleken.

2.7 Correlatiecoëfficiënt

De Correlatiecoëfficiënt (CC) geeft aan in hoeverre het opgerekte signaal overeenkomt met het referentiesignaal. De CC-waarde wordt uitgedrukt in een getal tussen de 0 (lage CC) en 1.0 (hoge CC). Een hoge CC geeft een grote mate van overeenkomst tussen de signalen weer. Een lage CC juist een minder goede overeenkomst. Binnen het tijdvenster wordt gezocht naar de dv/v-waarde behorende bij de maximale CC-waarde. Voor het laboratoriumonderzoek wordt gezocht naar een CC-waarde van minimaal 0.8. Voor dit onderliggende praktijkonderzoek wordt getracht een CC van 0.5 aan te houden voor een acceptabele mate van overeenkomst. De CC wordt bepaald met formule 2.10 [uit: (Kevinly, Zhang, Yang, Draganov, & Weemstra, 2021)].

$$CC(\varepsilon) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} h_{(stressed)}[t(1-\varepsilon)]h_{(baseline)}[t]dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} (h_{(stressed)})^2[t(1-\varepsilon)]dt} \sqrt{\int_{t_1}^{t_2} (h_{(baseline)})^2[t]dt}} \quad [2.10]$$

Hierin is:

ε = het golfsnelheidsverschil

t_1 = de starttijd van het meetvenster

t_2 = de eindtijd van het meetvenster

$h_{stressed}$ = het verschoven signaal

$h_{baseline}$ = het referentiesignaal.

De CC geeft daarmee dus aan hoe betrouwbaar de meetresultaten zijn. Een lage CC-waarde geeft aan dat de signalen slecht met elkaar te vergelijken zijn, waardoor de nauwkeurigheid van de meting ook lager is. Daarbij is de CC-waarde gevoelig gebleken voor scheurvorming (macro-niveau). Uit laboratoriumproeven (Kevinly, Zhang, Yang, Draganov, & Weemstra, 2021) is gebleken dat bij scheurvorming de CC-waarde sterk afneemt. De CC-waarde kan mogelijk ook worden gebruikt als scheurindicator.

3 PRAKTIJKMETING BRUG BEEKDAL KEERSOP

3.1 Inleiding

Het uitgevoerde onderzoek is op hoofdlijnen in drie fasen te onderscheiden; de voorbereiding, de praktische uitvoering en tot slot de analyse van de meetresultaten.

Het praktische onderzoek heeft zich in eerste instantie gericht op de eerste bouwfasen van de brug. Het is echter de intentie om de meetopzet ook in de toekomst te kunnen blijven gebruiken voor monitoring. In de voorbereidingen en uitvoering van de meetopstellingen is hier dan ook aandacht aan besteed.

3.2 Voorbereiding

De voorbereidingen van de metingen hebben deels plaats gevonden in het laboratorium van de TU Delft, faculteit Civiele Techniek. In het laboratorium zijn de te gebruiken “Smart Aggregates” (de sensoren) getest en geassembleerd tot de in de brug in te bouwen meetstokken. De Smart Aggregates fungeren in het meetsysteem zowel als actieve zendende sensor als passieve ontvangende sensor.

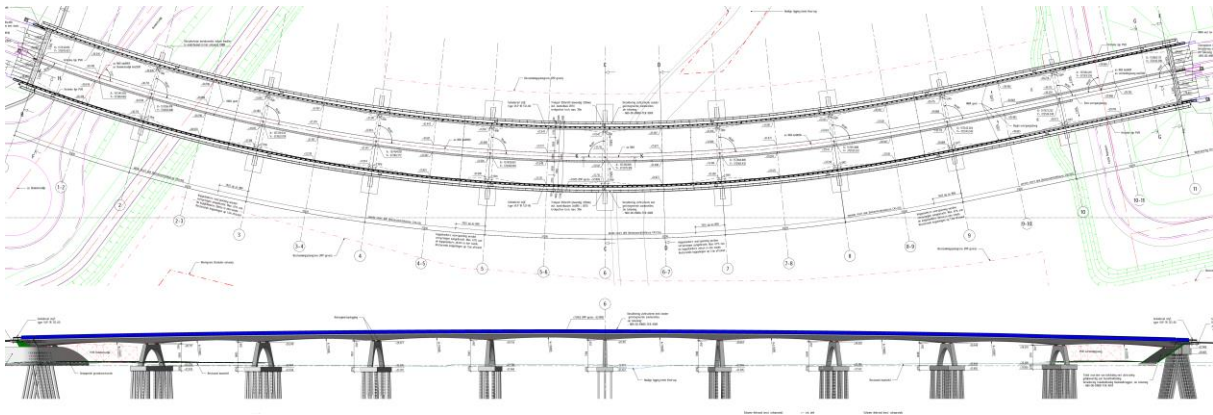
Daarbij is in de voorbereiding de analyse uitgevoerd voor de locaties van de meetposities. Hiervoor zijn de berekeningen en Kist-analyses gebruikt, welke in het ontwerpproces van de brug zijn opgesteld (Boskalis Nederland, 2019).

3.2.1 Bepaling locatie sensoren

De bepaling van de meetlocaties is zorgvuldig vastgesteld waarbij gekeken is welke posities interessante informatie kunnen bevatten over de verschillende fases en levensduur van de brug. De keuze van de posities is in deze paragraaf nader toegelicht waarbij eerst enig inzicht wordt gegeven in de geometrie en bouwwijze van de brug en de analyse van de Kist-effecten welke optreden ten gevolge van het gefaseerd bouwen van het brugdek.

3.2.1.1 Geometrie

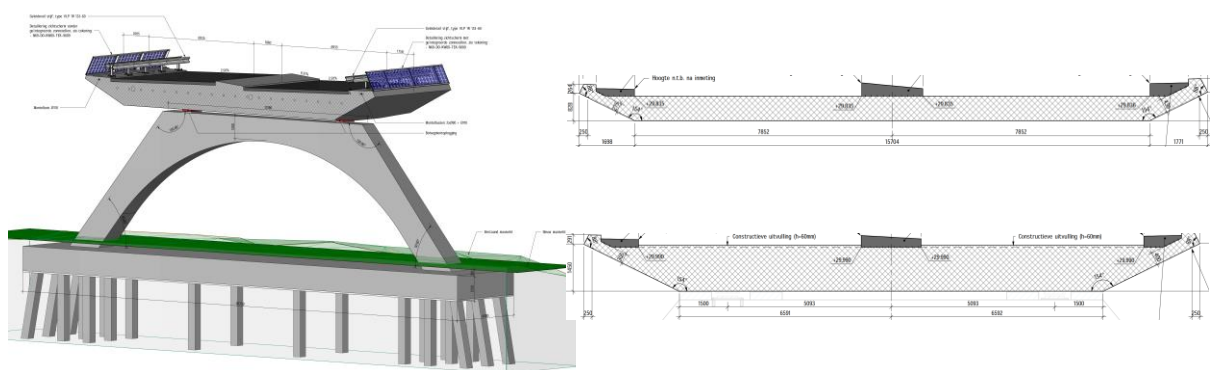
Kunstwerk 9 maakt onderdeel uit van de Nieuwe Verbinding N69 en kruist hooggelegen het Beekdal van de Keersop. De totale lengte van het kunstwerk bedraagt 312.5 m over de as gemeten en is opgebouwd uit 10 overspanningen van elk 31.25 m. De hoogte van de brug boven het maaiveld van het beekdal varieert grofweg tussen de 5 m en 7 m. De brug kruist naast de Keersop ook een lokale weg en de verbindingsweg N397. De brug ligt in een grote horizontale boogstraal van 450 m waarmee de ruimtelijkheid in de omgeving wordt benadrukt.



Figuur 3.1 Bovenaanzicht en langsdoorsnede KW9

De dekconstructie is uitgevoerd als een insitu te storten, gewapende en nagespannen betonconstructie. Het brugdek heeft in langsdoorsnede aan de onderzijde een getoogde vormgeving met een straal van ca. 175 m. De dikte van het dek verloopt hiermee van 1360 mm bij de steunpunten naar een dikte van 700 mm ter plaatse van het veldmidden. De dwarsdoorsnede van het dek heeft afschuinde randen. Door de in langsrichting variërende hoogte van het dek en de vaste hoek van de afschuining is de breedte van onderzijde dek variabel. Het dek is aan de bovenzijde ca. 19 m breed. Het dek biedt ruimte aan 2x1 rijbaan inclusief vluchtstroken, een brede middenberm en schampkanten aan weerszijden van de brug. De dekconstructie wordt uitgevoerd als 1 doorgaand dek welke gefaseerd wordt gestort.

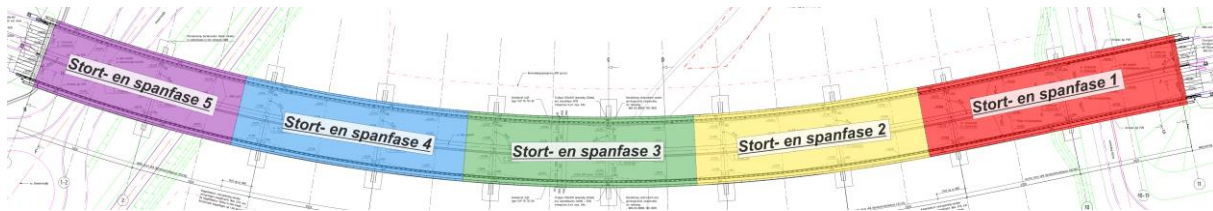
De onderbouw wordt uitgevoerd met hooggefundeerde landhoofden en boogvormige pijlerconstructies, gefundeerd op prefab palen gefundeerde poeren. De pijlers hebben een open karakter door middel van een cirkelvormige opening en de spreidstand van de kolommen. De pijlers staan haaks op de as van de weg.



Figuur 3.2 Constructie KW09

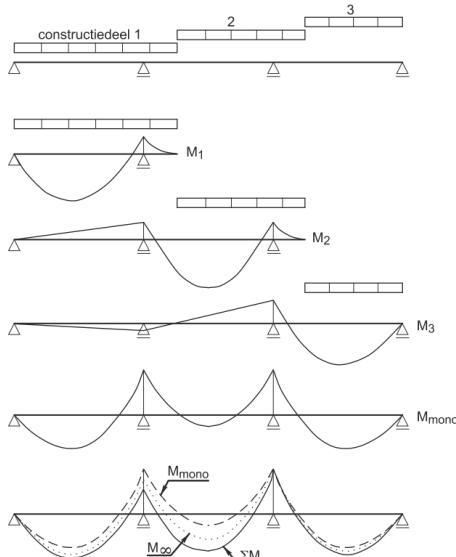
3.2.1.2 Kist-analyse

De dekconstructie van KW9 wordt in 5 fases gestort. Het dek wordt uitgebouwd per (ca.) 2 velden. De voorspanning wordt in de stortvoeg van de fasering doorgekoppeld. Het dek wordt vanaf het landhoofd met het vasthoudpunt serieel uitgebouwd naar het andere landhoofd.



Figuur 3.3 Principe stortfasering

De stortvoegen zijn gekozen in (ca.) het momentennulpunt van de constructie onder eigen gewicht en voorspanbelastingen. Dit punt is bepaald op 7.6 m vanaf het steunpunt. De stortfaseringen worden daarmee met een overstek over het steunpunt uitgevoerd. Tijdens het uitvoeren van de (aansluitende) stortfaseringen, treden er wijzigingen op in de krachtsverdeling van het brugdek. Daarnaast treden er ook in de loop van de tijd verschuivingen op in de krachtsverdeling ten gevolge van kruip. Dit effect wordt het Kist-effect genoemd. In Figuur 3.4 is het principe van het verschuiven van de krachtsverdeling weergegeven.



Figuur 3.4 Wijzigen krachtsverdeling gefaseerde bouw [Bron: dictaat Voorgespannen Beton (Galjaard, 2016)]

Het bepalen van de krachtsverdeling inclusief de zogeheten Kist-effecten is uitgevoerd op basis van artikel 5.4(5) uit de NEN-EN-1992-1-1 incl. NB. Het effect heeft alleen betrekking op de belastingen welke aangrijpen tijdens het wijzigen van het statisch systeem. In dit geval betreft dit de belasting door het eigen gewicht en de voorspanbelastingen. De krachtsverdeling wordt berekend door de sommatie van :

Krachtenverdeling oorspronkelijk Statisch Systeem vermenigvuldigen met $e^{-\varphi(\infty, t_0)}$ [3.1]

Krachtenverdeling Nieuw Statisch Systeem vermenigvuldigen met $1 - e^{-\varphi(\infty, t_0)}$ [3.2]

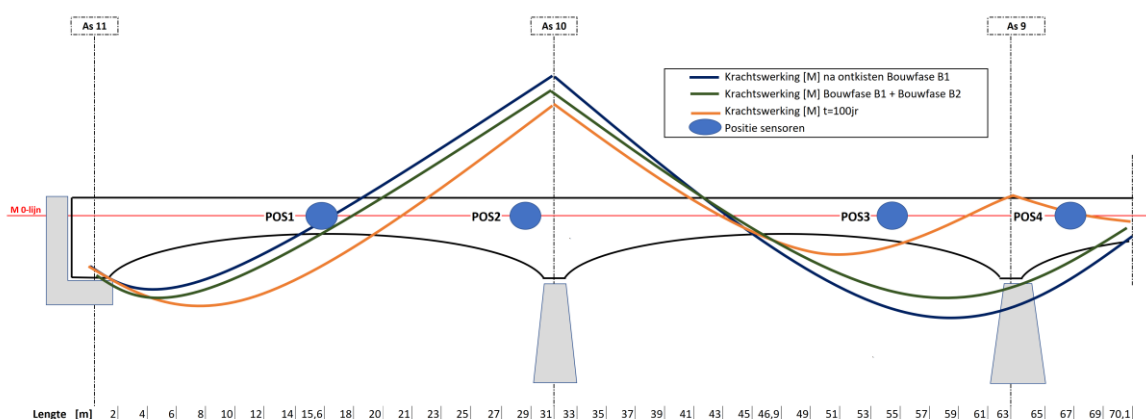
Hierin is $\varphi(\infty, t_0)$ de kruipcoëfficiënt welke wordt bepaald met:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 * \beta_c(t, t_0) \quad [3.3]$$

Deze formule wordt toegelicht in NEN-EN-1992-1-1 incl. NB, bijlage B. De krachtsverdeling over de 1^e stortfase in de verschillende fases en Kist-verschuivingen is overgenomen uit de ontwerpdocumenten van de brug (Boskalis Nederland, 2019). De relevante krachtsverdeling ten gevolge van eigen gewicht en voorspanning van bouwdeel 1 van de brug is in een grafiek verwerkt en opgenomen in bijlage A. Hierin is de verschuiving van de krachtsverdeling in de tijd te zien ten gevolge van het veranderen van het statisch systeem en de Kist-effecten. In Figuur 3.5 is een geïdealiseerde weergave hiervan geprojecteerd in dit bouwdeel van de brug.

3.2.1.3 Meetposities

Voor de bepaling van de locatie van de sensoren is gezocht naar posities welke interessant zijn qua krachtsverdeling in het algemeen, maar met name waar dusdanige wijzigingen in de krachtsverdeling te verwachten zijn, dat deze mogelijk gevonden kunnen worden met behulp van de CWI. De grootste verschuivingen zijn te verwachten in het eerste bouwdeel van de brug. Ook gezien de intentie om de sensoren voor langere tijd te gebruiken om bijvoorbeeld kruip-effecten te gaan meten, maakt dat dit bouwdeel het meest voor de hand liggend is. Aan de hand van de momentenlijnen in de verschillende fases van de brug (bouwphase tot aan levensduur 100 jaar) is gekozen voor een viertal posities. In Figuur 3.5 is de krachtsverdeling geprojecteerd in de langsdoorsnede van het eerste bouwdeel van de brug. Dit betreft de geïdealiseerde weergave van de krachtsverdeling direct na ontkisten van de eerste bouwphase, na ontkisten van de tweede aansluitende bouwphase en op $t=100$ jaar. Te zien is dat ten gevolge van het excentrisch aangrijpen van de voorspanning de momentenlijn bij de uitkraging en bij het landhoofd niet bij 0 kNm/m begint.



Figuur 3.5 Meetposities in relatie verschuiving krachtsverdeling

De gekozen posities zijn bepaald op:

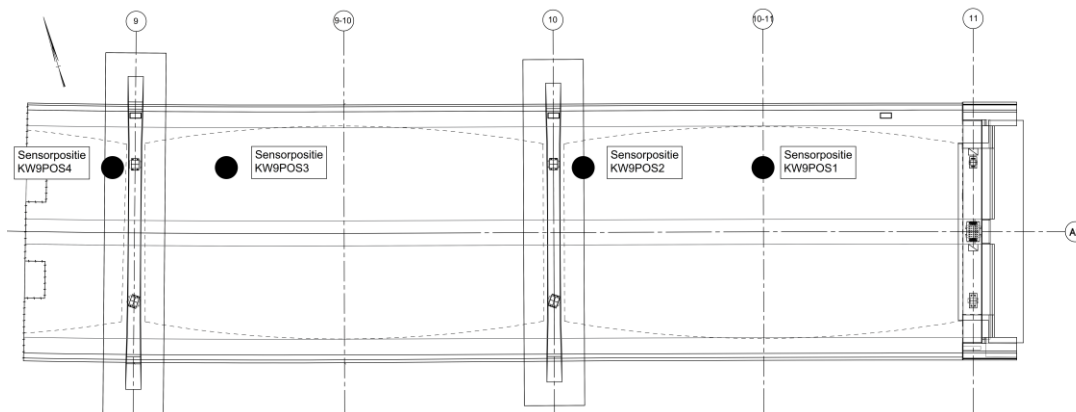
Positie 1: in het veldmidden van het eindveld.

Positie 2: nabij het eerste tussensteunpunt.

Positie 3: op ca. $\frac{3}{4}$ van de overspanning van het eerste tussenveld.

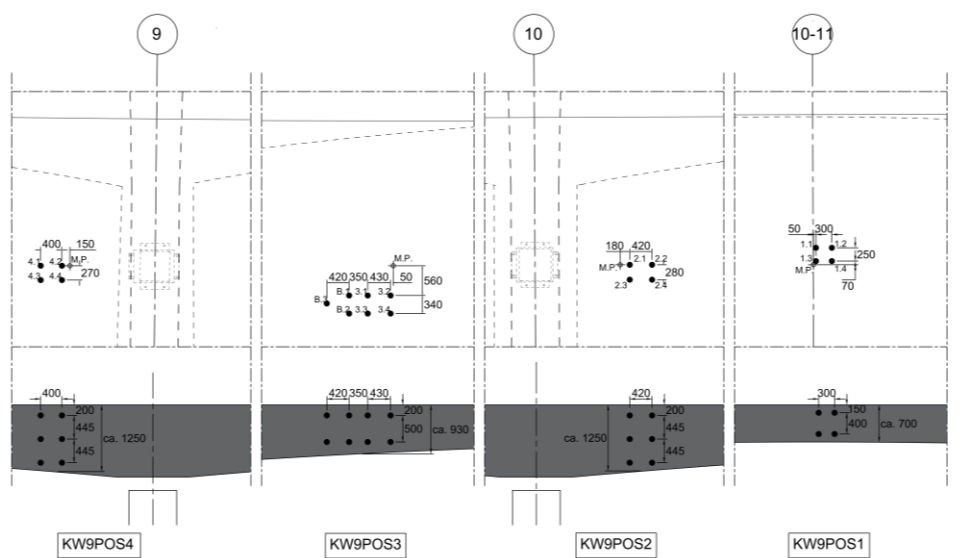
Positie 4: nabij het 2^e tussensteunpunt, aan de zijde van de overstek van de 1^e stortfase.

In het bovenaanzicht van het dek zijn deze meetposities weergegeven in Figuur 3.6.



Figuur 3.6 Meetposities bovenaanzicht

De sensoren moeten in een dusdanig grid worden ingestort, dat de te sturen signalen vanuit de op dat moment actieve sensor kunnen worden opgevangen door de passieve sensoren. De maximale reikwijdte van de sensor bedraagt ca. 0.5 m. Daarbij dient er zo min mogelijk verstoring in het gebied te zijn voor de signalen zoals dichte wapening, voorspanbuizen en HWA-buizen. De meest nuttige en betrouwbare data wordt verkregen met de sensoren welke in lijn met elkaar staan. De lijn en montage van de sensoren is zo gekozen dat deze het signaal in de overspanningsrichting van de brug goed kan worden opgevangen. Per locatie worden aan de bovenzijde en aan de onderzijde van de constructie sensoren ingestort. De sensoren zijn binnen de wapening aangebracht, op 150-200 mm van de buitenzijde van de constructie. Bij de hogere doorsnede ter plaatse van positie 2 en 4 is een extra sensor in het midden van de doorsnede om toch ook in de schuine richting binnen het bereik van de sensoren te blijven. Ter plaatse van locatie 3 zijn extra sensoren ingestort om een groter gebied te kunnen monitoren. In Figuur 3.7 is in bovenaanzicht en langsdoorsnede de configuratie van de sensoren weergegeven.

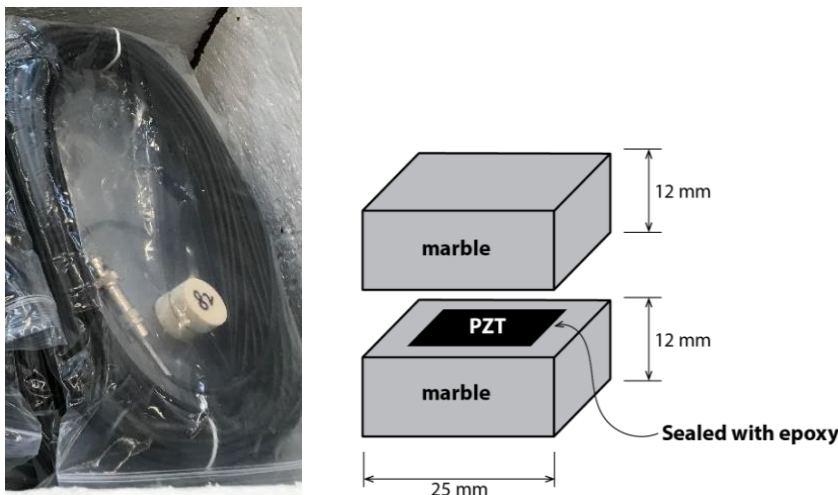


Figuur 3.7 Maatvoering grids sensoren

In de voorbereiding is uitgewerkt hoe en waar de sensoren in de constructie kunnen worden aangebracht, zonder dat er te veel verstoring binnen de meetgroep ontstaat ten gevolge van de aanwezige wapening. In bijlage B zijn screenshots opgenomen van het wapeningsplan waarin de sensoren zijn geprojecteerd. In de dwarsrichting van het dek gezien, is de positie bepaald in de lijn van de opleggingen aan de noordzijde van brug. De bedrading van de sensoren wordt naar de meest nabijgelegen trekput gebracht zoals aangegeven op de overzichtstekening in bijlage B, zodat de connectoren ook bereikbaar blijven voor toekomstige metingen.

3.2.2 Smart Aggregates

De in te storten Smart Aggregates, de sensoren, bestaan uit twee marmeren blokjes met een diameter van ca. 2.5 cm en een totale dikte van ca. 2.0 cm. Tussen de blokjes zit een piëzo-elektrisch materiaal. Het piëzo-elektrische materiaal heeft de eigenschap om het door de meetapparatuur uitgezonden elektrische signaal om te zetten in een ultrasone geluidsgolf. Aan de blokjes zit een kabel met een connector welke kan worden aangesloten op de meetapparatuur.

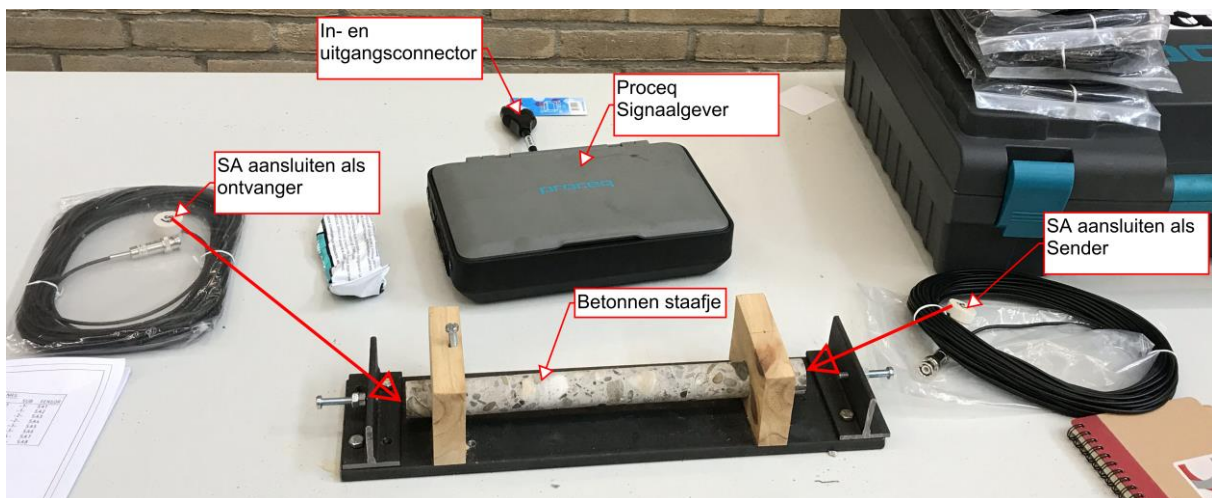


Figuur 3.8 L: Smart Aggregate zoals toegepast. R: opbouw principe SA [Bron presentatie Dr. Ir. Y. Yang]

3.2.3 Kalibratie Smart Aggregates

De sensoren worden ongekalibreerd aangeleverd. Omdat er enige variatie in de gevoeligheid van deze sensoren kan zitten, zijn deze na ontvangst doorgemeten. Hierbij zijn steeds twee sensoren aangesloten op een betonnen staafje. Met een vaste verzendende sensor is gemeten hoe groot de amplitude van het ontvangen signaal bedroeg bij de ontvangende sensor. Met de vergrotingsfactor van het signaal, de gain, is gezocht naar ordegrrootte gelijke amplitude van alle sensoren. Bij deze kalibratie is geconstateerd dat enkele sensoren bovengemiddeld gevoelig waren (lage gain) en andere juist onder gemiddeld (hoge gain). In de positionering van de sensoren is hier rekening mee gehouden. De bovengemiddeld gevoelige sensoren zijn toegepast in de verlenging van het onderzoeksgebied ter plaatse van locatie 3. De ondergemiddelde gevoelige sensoren zijn toegepast ter plaatse van de hogere

doorsnede locatie 2 als middensensoren. In Figuur 3.9 is de meetopstelling te zien van deze kalibratie.



Figuur 3.9 Opstelling kalibratie sensoren

3.2.4 Assemblage meetstokken

Om de sensoren op de juiste positie in het dek in te storten, zijn meetstokken voorbereid waaraan de sensoren zijn gemonteerd. Een meetstok bestaat uit een gebogen wapeningsstaaf $\varnothing 10$ (model "wandelstok"). Aan de hand van de montagetekeningen zijn twee of drie sensoren op de juiste posities aan de wapeningsstaven gelijmd. Hierbij is de richting van de sensor zo gekozen dat het piëzo-elektrisch materiaal in de overspanningsrichting van de brug wordt geplaatst. Een impressie van de assemblage is weergegeven in Figuur 3.10. De wandelstokken worden om de 2^e wapeningslaag opgehangen. Voor een goede identificatie van de sensoren zijn ter plaatse van de connectoren aan het eind van de kabel labels aangebracht met het nummer van de betreffende sensor. In bijlage B zijn de complete montagetekeningen van alle posities opgenomen.



Figuur 3.10 Assemblage meetstokken

Door de meetstok op te hangen aan het bovennet en met lijm aan het ondernet te fixeren, zijn de meetstokken stevig vastgezet. De bekabeling van de sensoren is gebundeld en onder het bovennet naar de schampkant gebracht.

De meetstokken zijn kort voorafgaand aan de stort in het werk gemonteerd. De wapening was op dit moment nagenoeg gereed. Ondanks de zorgvuldige voorbereiding ten aanzien van de positionering van de meetstokken tussen de wapening zijn tijdens montage van de meetskakken in het werk zijn toch enkele kleine verschuivingen aangebracht in verband met aanwezige (support)wapening en dichte wapeningsconcentraties. Er waren op het dek enkel nog afrondende werkzaamheden aan de gang. Hierdoor was een risico op schade aan de sensor en de bekabeling minimaal. Gebleken is dat alle sensoren en bekabeling intact is gebleven. De locaties van de meetstokken zijn met het ID-nummers van de sensoren vastgelegd. Door de aangebrachte labels ter plaatse van de connectoren is precies bekend welke sensor zich waar in de constructie bevindt.



Figuur 3.11 Impressie montage meetstokken. L: Meetstok in wapeningsnet. R: Bekabeling naar toekomstige trekput in schampkant

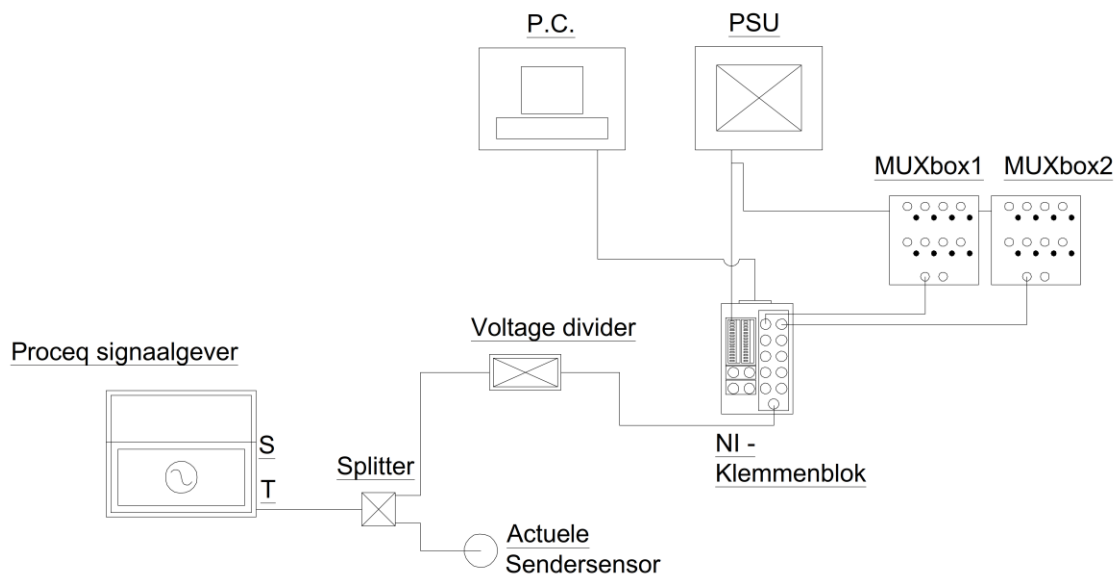
3.2.5 Meetapparatuur

Voor het uitvoeren van de metingen is gebruik gemaakt van meetapparatuur welke door de TU Delft specifiek is samengesteld voor het uitvoeren van de metingen aan de brug.

De meetopzet wordt aangestuurd door de Proceq signaalgever. De Proceq stuurt een elektrisch pulssignaal naar de sensor welke als sturende sensor is aangesloten. Het pulssignaal wordt tevens via de spanningsverdeler, naar een klemmenblok gestuurd. Hiermee wordt door de meetcomputer de synchronisatie bewerkstelligd van het verstuurde signaal met de ontvangen gegevens vanuit de Multiplexer-boxen (MUX). De spanningsverdeler beschermt daarbij het klemmenblok voor het hoge Voltage van de Proceq signaalgever. Op de MUX-boxen worden de overige sensoren van de meetpositie aangesloten welke nu als ontvangende sensor fungeren. Bij het uitvoeren van de meting, wordt het door de actieve sensor uitgezonden signaal door alle andere sensoren opgevangen. Het Multiplexersysteem zorgt ervoor dat alle zender-ontvanger-combinaties worden uitgevoerd en de data systematisch wordt opgeslagen. Na het uitvoeren van de meting wordt deze sturende sensor als ontvangende sensor aangesloten en wordt de volgende sensor als sturende sensor

aangesloten. Alle sensoren binnen de meetgroep worden op deze wijze een keer als actieve, sturende, sensor gebruikt.

In Figuur 3.12 is het gebruikte meetsysteem geschematiseerd weergegeven waarvan een aantal componenten op de foto in Figuur 3.13 zijn terug te zien.

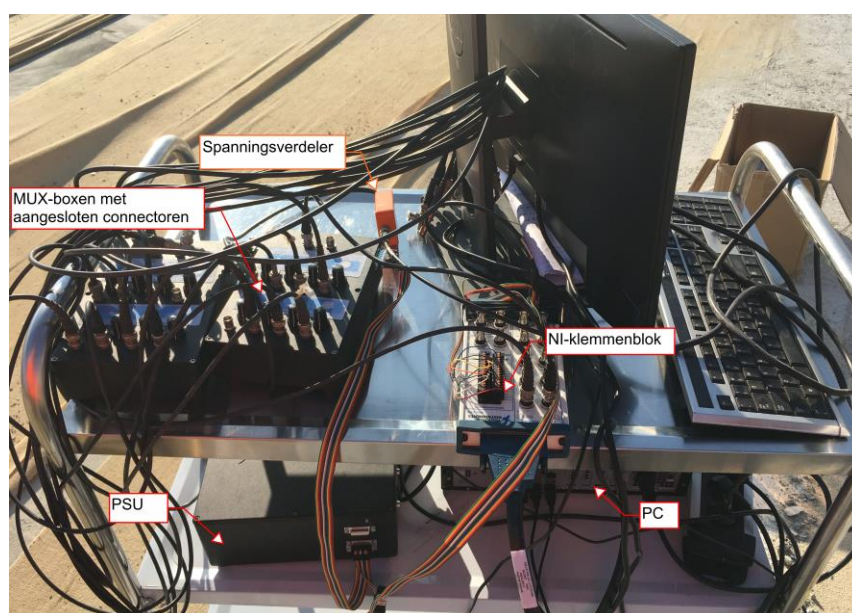


Figuur 3.12 Schema meetsysteem

In Tabel 3.1 zijn de verschillende onderdelen van het meetsysteem met hun betreffende functie omschreven.

Tabel 3.1 Onderdelen meetsysteem

Onderdeel	Functie
Proceq signaalgever	Geeft het elektrische puls signaal af aan de actieve, sturende sensor
Splitter	Stuurt het uit de Proceq uitgaande signaal naar de spanningsverdeler en de sensor welke als sturend is aangesloten
Spanningsverdeler	Signaalreductie tbv beveiliging van het klemmenblok e.v. Fungeert als signaalgever waarmee de meetcomputer het startpunt van de meting ontvangt en synchroniseert met de ontvangen data.
NI-klemmenblok	Omzetting van analoog (fysiek) signaal naar een digitaal signaal
MuxBox 1&2	Aansluiting van de ontvangende sensoren. Totale capaciteit bedraagt 2x8 sensoren tegelijkertijd.
PSU	Stroomvoorziening MUX
P.C.	Registratie, verwerking, opslag en weergave van de ontvangen data



Figuur 3.13 Enkele componenten meetsysteem

3.2.6 Meetplan

Tijdens de bouwphase van de brug zijn er kort na elkaar enkele primaire momenten waarin de constructie een aantal wijzigingen ondergaat. Op basis van deze wijzigingen zijn de meetmomenten vastgesteld welke voor dit onderzoek zijn gebruikt. Tijdens de allereerste uren en dagen zijn de gekozen momenten interessant om een ontwikkeling te meten, waarin ook nog veel hydratatieprocessen plaatsvinden. De meetmomenten daarna zijn gekozen wanneer een significante krachtwijziging danwel wijziging van het statisch systeem plaatsvindt. De metingen zijn zo strak als mogelijk uitgevoerd op de daadwerkelijke realisatiemomenten. In Tabel 3.2 zijn de meetmomenten opgenomen zoals deze daadwerkelijk zijn uitgevoerd.

Tabel 3.2 Meetmomenten

Meting	Omschrijving	dd.	Dag na stort
1	Direct na stort	15-09-2020	1
2	Na aanbrengen 20% voorspanning	21-09-2020	10
3	Na aanbrengen 100% voorspanning	25-09-2020	14
4	Ontkisten bouwphase 1	30-10-2020	30
5	Ontkisten aansluitende bouwphase 2	17-12-2020	97

Na deze meetmomenten hebben er nog enkele meetmomenten plaatsgevonden, voorafgaand aan de openstelling van de brug. Deze zijn niet meer opgenomen in dit rapport. Ook in de (nabije) toekomst zal het meetsysteem nog in ontwikkeling blijven en zullen de sensoren gebruikt blijven worden.

3.2.7 Proefstukken

Tijdens het storten van het dek zijn 2 proefcilinders op de bouwlocatie meegestort met hetzelfde betonmengsel waarmee het brugdek is gestort. Daarbij zijn 12 kubussen gestort waarop drukproeven zijn uitgevoerd. De cilinders, met een diameter van 300 mm en een hoogte van 500 mm, zijn voorzien van 2 sensoren. Het doel van de cilinders is om referentiemetingen en validatie te kunnen uitvoeren van de golfsnelheid gedurende het hydratatieproces van het beton. De sensoren in de cilinders zijn hiervoor een aantal keer mee genomen met de metingen tijdens genoemde meetmomenten.



Figuur 3.14 Cilinders en kubussen op bouwlocatie [L] en meetopzet laboratorium [R]

De cilinders zijn ook gebruikt voor een drukproef in het laboratorium. Deze drukproef op de cilinders is uitgevoerd in 2 cycli. De cilinders zijn belast tot een drukbelasting welke overeenkomt met ruim de voorspanbelasting in het dek. De belasting is in stappen van 300 kN verhoogd en weer verlaagd met een snelheid van 4 kN/s. Tussen elke belastingstap zijn de sensoren gemeten. Aanvullend is de vervorming van de cilinders gemeten met behulp van reksensoren welke aan de cilinders zijn bevestigd.

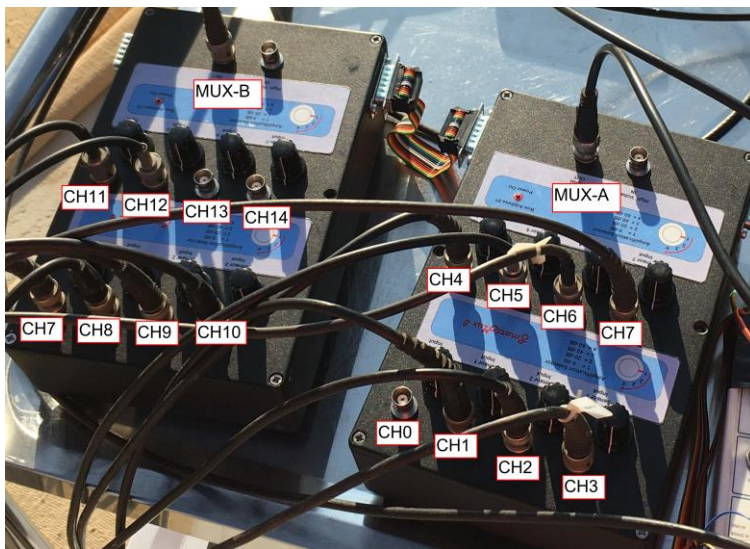
3.3 Uitvoering veldmetingen

De metingen zijn uitgevoerd op 5 momenten (zie Tabel 3.2). Op alle meetmomenten zijn de 4 locaties gemeten, behoudens tijdens de 3^e meting. In verband met de slechte weersomstandigheden is besloten om Positie 4 niet mee te nemen in deze meting. Positie 4 betreft de locatie op de overstek van de 1^e stortfasering. Aangezien de overstek “pendelt” na het aanbrengen van de voorspanning, wordt na meetmoment 3 (aanbrengen 100% voorspanning) geen additionele spanningswijziging van de overstek verwacht ten opzichte van meetmoment 4 (verwijderen ondersteuning). Gekozen is om de meetpositie daarom weer mee te nemen met de 4^e meting.

Bij het uitvoeren van de metingen wordt steeds 1 sensor aangestuurd als de sturende sensor (zie ook par. 3.2.5). Vanaf deze sensor wordt het pulssignaal uitgezonden, wat vervolgens

wordt opgevangen door de andere sensoren binnen de meetpositie. Door steeds te wisselen van de sturende sensor wordt een nauwe hoeveelheid data verkregen over alle richtingen van het onderzochte gebied in de constructie. Per meetmoment wordt een logbestand bijgehouden. In dit logbestand wordt per meetpositie de starttijd van de metingen, de instellingen (Voltage) van de Proceq signaalgever en de ID's genoteerd van het bestand waarnaar de data van de meting wordt weggeschreven met het respectievelijke MuxBox-kanaal van de sturende sensor. Op deze wijze is de historie van de meting te achterhalen. De logbestanden zijn opgenomen in bijlage C.

Voor de nabewerking van de meetdata is het van belang dat de sensoren bij elke meting steeds op dezelfde kanalen ("Channels") van de MUX-boxen worden aangesloten. Op de in de bijlage B opgenomen montagetekeningen zijn per locatie de label-ID's van de sensoren aangeven met daarbij het steeds aangehouden kanaalnummer op de MUX-boxen.



Figuur 3.15 Kanaalnummering MUX-boxen (CHx)

4 RESULTATEN EN ANALYSE CWI KW09

Bij het uitvoeren van de metingen worden de meetresultaten opgeslagen in ruwe data-bestanden. Deze bestanden moeten worden nabewerkt alvorens de opgenomen informatie kan worden gebruikt voor verdere analyse. De voor dit onderzoek gebruikte meetresultaten van Meetpositie 3 zijn gespiegeld aan de theoretisch berekende spanningsniveau's ten tijde van de verschillende bouwfases en hierop geanalyseerd. De resultaten van de laboratoriumproeven zijn hierbij gebruikt voor een beschouwing en verantwoording van deze analyse.

4.1 Nabewerking data

De nabewerking is uitgevoerd met het programma Matlab. De ruwe data omvat een aanzienlijke hoeveelheid informatie welke niet allemaal bruikbaar is. Een praktisch werkbaar script om de data te sorteren, filteren en te visualiseren is hiervoor gebruikt. In bijlage D zijn de toegepaste Matlab-codes opgenomen.

Gedurende de nabewerking is gebleken dat er diverse verstoringen aan de meetsignalen zijn ontstaan en dat signalen van dusdanige lage kwaliteit waren dat verdere analyse van het signaal en de toegepaste scripts nodig was.

4.1.1 Verwerking ruwe data

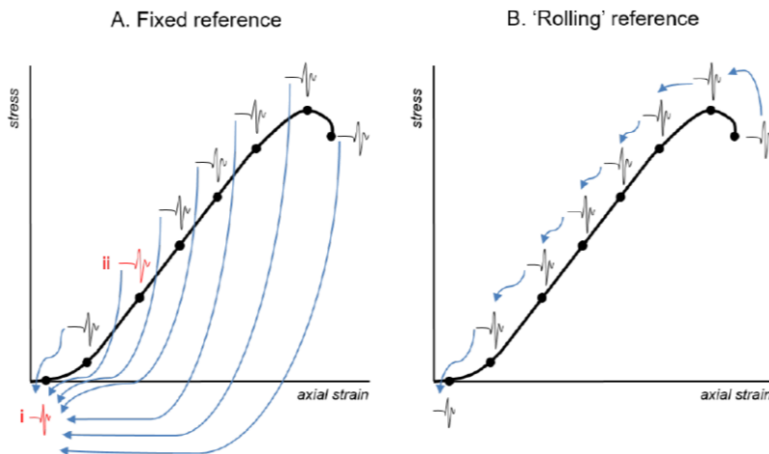
Door alle sensoren een keer als sturende sensor te laten fungeren wordt een aanzienlijke hoeveelheid data verkregen: 4 Posities, totaal 46 sensoren en 5 meetmomenten Dit levert totaal 2740 ontvangen databestanden op met daarin de gegevens van de ontvangen data van 14 kanalen. Dit betreft nog ruwe, kale data in de vorm van xls-bestanden.

In Figuur 4.1 is een klein deel te zien van 1 meetbestand van een meting waarbij naast het tijdspad de 14 MUX-kanalen zijn te zien. Middels postprocessing in het programma Matlab wordt de verkregen data geordend en gefilterd op bruikbare data. Niet op elke locatie zijn namelijk alle 14 kanalen aangesloten geweest, maar deze geven wel een waarde in het meetbestand. Deze onnodige data moet worden verwijderd. Na de ordening van alle databestanden kan de verdere nabewerking plaatsvinden.

Index	Time	A_0_Filter	B_0_Filter	A_1_Filter	B_1_Filter	A_2_Filter	B_2_Filter	A_3_Filter	B_3_Filter	A_4_Filter	B_4_Filter	A_5_Filter	B_5_Filter	A_6_Filter	B_6_Filter	A_7_Filter	B_7_Filter
0	0	-0,04329	-0,03598	0,026843	-0,02988	-0,00304	-0,02649	0,003991	-0,01084	-0,01322	-0,00711	0,004897	-0,02506	-0,04904	-0,00628	0,019542	-0,00584
1	0	-0,04279	-0,03634	0,0263283	-0,03019	0,045653	-0,02677	0,248575	-0,01111	0,246596	-0,00692	0,285687	-0,02504	0,154083	-0,00641	0,266397	-0,00537
2	0,000001	-0,03631	-0,03772	0,60963	-0,03175	0,121343	-0,02826	0,628628	-0,0125	0,66097	-0,00775	0,713872	-0,02675	0,510252	-0,0079	0,653918	-0,00673
3	0,000001	-0,02669	-0,03848	0,84382	-0,03286	0,146768	-0,02942	0,910814	-0,0137	0,942124	-0,00913	0,814593	-0,02827	0,652231	-0,00945	0,736641	-0,00831
4	0,000001	-0,02339	-0,03752	0,609172	-0,03172	0,094395	-0,02866	0,637992	-0,01287	0,670063	-0,00902	0,503628	-0,0275	0,460204	-0,00908	0,479817	-0,00818
5	0,000002	-0,0319	-0,03511	0,102941	-0,02909	0,006031	-0,02637	0,038217	-0,01005	0,10115	-0,00713	0,070048	-0,02472	0,102993	-0,00683	0,102785	-0,00631
6	0,000002	-0,04474	-0,03373	-0,23016	-0,02699	-0,03828	-0,02462	-0,37241	-0,00775	-0,20421	-0,00511	-0,12835	-0,02247	-0,10766	-0,00474	-0,03304	-0,00455
7	0,000002	-0,05045	-0,03474	0,001178	-0,02803	-0,00488	-0,02554	-0,12442	-0,00888	0,131116	-0,00526	0,00898	-0,0234	-0,02129	-0,00524	0,13498	-0,00464
8	0,000003	-0,04494	-0,03715	0,424811	-0,03134	0,052025	-0,02828	0,395366	-0,01215	0,637149	-0,0076	0,233202	-0,0262	0,185622	-0,00747	0,308289	-0,00671
9	0,000003	-0,03677	-0,03824	0,471985	-0,0333	0,054111	-0,0297	0,561457	-0,01419	0,681541	-0,00941	0,29704	-0,02799	0,210985	-0,00883	0,153062	-0,00844
10	0,000003	-0,03627	-0,03748	0,119075	-0,03218	0,003346	-0,02857	0,245867	-0,0134	0,26221	-0,00879	0,151021	-0,02703	0,043904	-0,00782	-0,19864	-0,00781
11	0,000004	-0,0432	-0,03599	-0,2041	-0,03021	-0,03733	-0,02693	-0,15099	-0,01188	-0,14063	-0,00737	-0,01723	-0,02541	-0,08683	-0,00603	-0,3246	-0,00598
12	0,000004	-0,04951	-0,03607	-0,13996	-0,02986	-0,0281	-0,02683	-0,2805	-0,01166	-0,13989	-0,0069	-0,04243	-0,02547	-0,04055	-0,00595	-0,04815	-0,00543
13	0,000004	-0,04981	-0,03753	0,125127	-0,03118	0,003883	-0,02813	-0,16545	-0,0126	0,103066	-0,00798	0,006011	-0,02693	0,059018	-0,00759	0,351192	-0,00698
14	0,000005	-0,04676	-0,03821	0,195777	-0,03186	0,008514	-0,02922	-0,05892	-0,01296	0,217672	-0,00888	0,000939	-0,02781	0,005439	-0,00862	0,424686	-0,00844

Figuur 4.1 Printscreen ontvangen meetdata

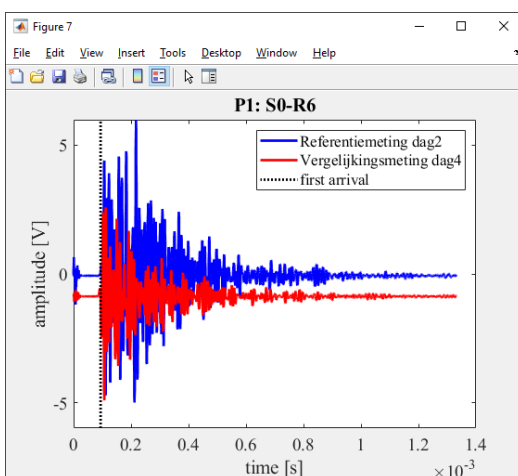
De verdere dataverwerking bestaat uit het vaststellen van de eerste aankomsten van het signaal waarna de CWI wordt uitgevoerd op de gewenste signalen en tijdvensters. De resultaten worden verwerkt in diverse plots. Bij het verwerken van de CWI is in eerste instantie uitgegaan van het rolling reference-principe. Hierbij wordt steeds het voorgaande signaal gebruikt als referentiesignaal, zie Figuur 4.2. Deze methode is gekozen omdat hierbij de meest recente signalen worden gebruikt waarbij is getracht tussentijdse verstoringen te voorkomen, wat de betrouwbaarheid van de CWI ten goede komt.



Figuur 4.2 Principe rolling reference [Bron: (Fu, 2022)]

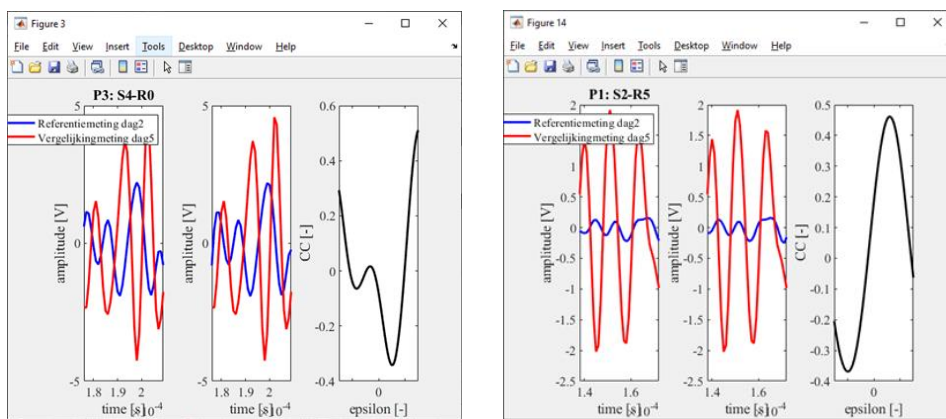
4.1.2 Verstoringen meetsignalen

Tijdens de nabewerking zijn enkele terugkerende verstoringen aan de meetdata geconstateerd. Vanaf de 3^e meting bleek Mux-box kanaal 6 een afwijkend signaal te geven. De signalen waren in verticale richting verschoven ten opzichte van de andere signalen. Voor een goede CWI en bruikbaarheid van de signalen van dit kanaal is in de nabewerking een analyse geprogrammeerd waarbij het signaal daar waar nodig wordt teruggeschoven naar de 0-lijn op de y-as.



Figuur 4.3 Voorbeeld verticale verschuiving signaal

Een ander terugkerend issue betrof het zogeheten cycle skipping. Hierbij is het dv/v -diagram niet volledig ontwikkeld waardoor er geen duidelijke top is waar te nemen van de dv/v ten opzichte van de CC-waarde. Om dit effect zo veel mogelijk te beperken is het beschouwde tijdvenster vergroot, waarbij is gekeken naar de overheersende frequentie. Een aantal resultaten van deze FFT-analyse is opgenomen in bijlage E. Het tijdvenster is vastgesteld op basis van een frequentie van 50 kHz. Daarnaast bleek in de staart, de coda, van het signaal relatief veel verschil in de vorm van de golf te zitten. Ondanks het feit dat er een bepaalde mate van overeenkomst wordt gevonden met een bijbehorende dv/v -waarde kan men zich afvragen wat de waarde van dit resultaat is. Vanwege dit fenomeen is er voor gekozen om de CWI voor dit onderzoek te concentreren op het eerste en eventueel het tweede tijdvenster, waarmee dus juist is gekeken naar de eerdere aankomsten van het signaal.

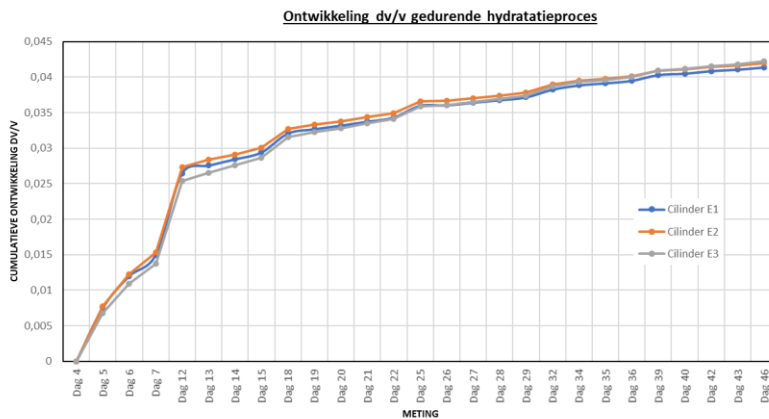


Figuur 4.4 "Cycle Skipping" signaal (L) en afwijkende golfvorm van de signalen (R)

4.2 Resultaten Laboratoriumonderzoek

4.2.1 Cilindertests

De op de bouwplaats gestorte cilinders zijn tijdens de meetmomenten meegenomen met de metingen. Het doel van de metingen was om de ontwikkeling van de golfsnelheid gedurende het verhardingsproces van het betreffende betonmengsel te monitoren. Helaas is gebleken dat deze metingen van dusdanige slechte kwaliteit waren, dat de resultaten niet bruikbaar zijn voor dit onderzoek. Om toch een indicatie van de ontwikkeling van het golfsnelheidsverschil tijdens het hydratatieproces te krijgen, zijn de resultaten van een drietal cilinders opgevraagd welke beschikbaar waren vanuit de TU Delft. De resultaten van deze metingen zijn weergegeven in Figuur 4.5.



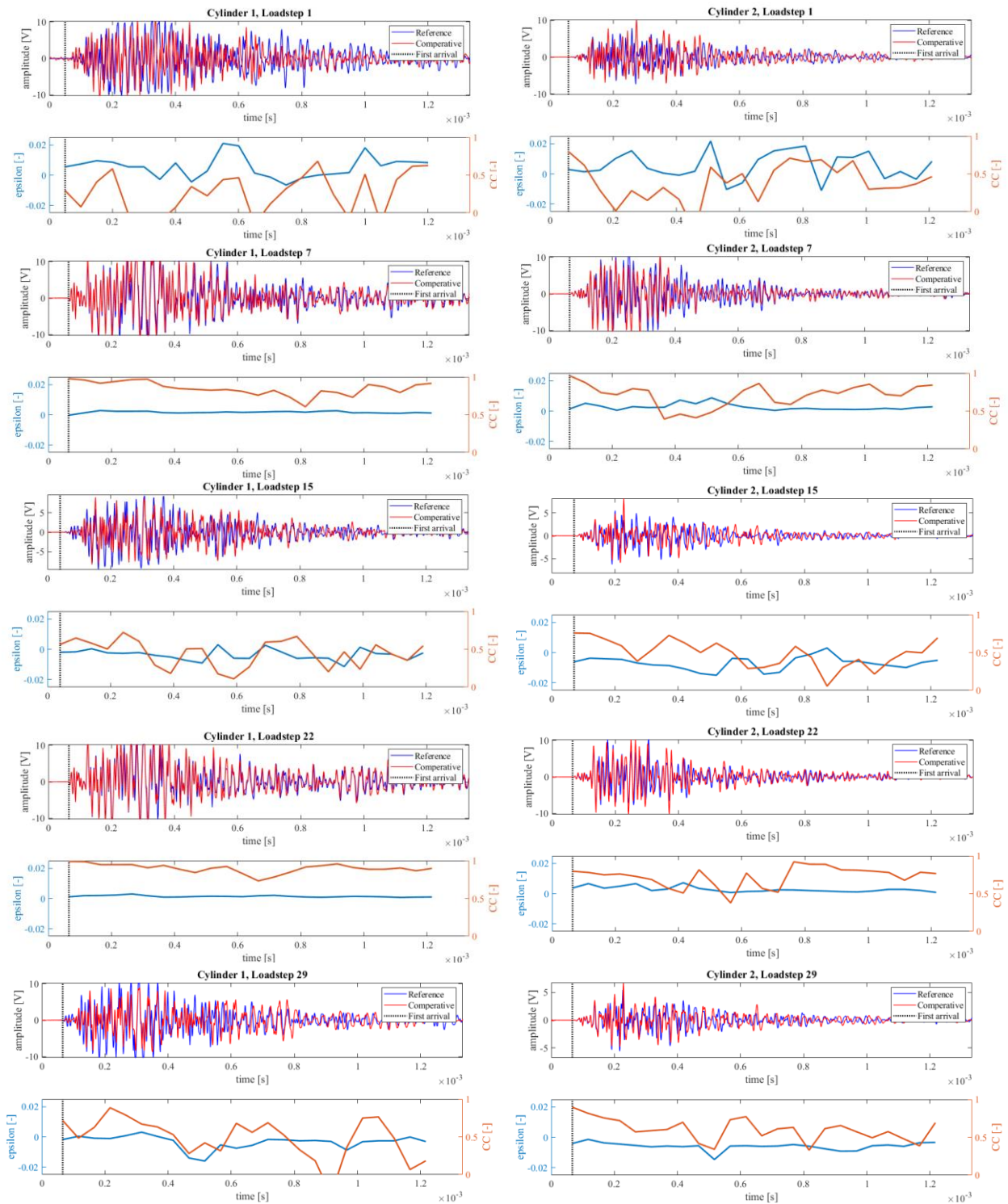
Figuur 4.5 Hydratatie-dv/v ontwikkeling cilinders laboratorium

De exacte toegepaste betonmengsels van deze cilinders zijn echter niet bekend. De resultaten zijn om deze reden en gezien het feit dat het verhardingsproces van een cilinder moeilijk is te vergelijken met het brugdek kwantitatief niet te koppelen aan de meetresultaten van de brug. De resultaten geven echter wel een beeld van de doorontwikkeling van dv/v gedurende de hydratatie van het beton.

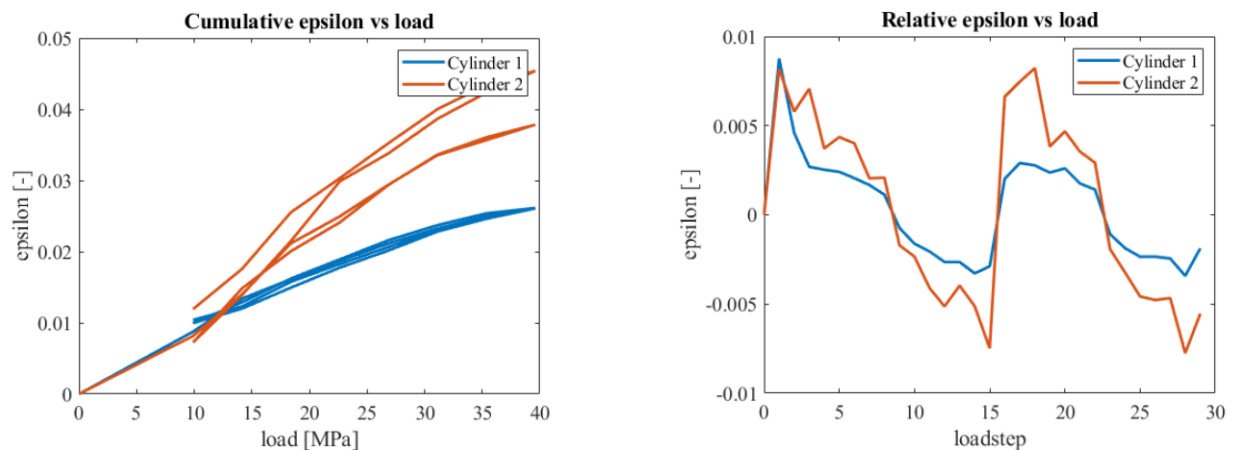
Op de meegestorte cilinders zijn wel drukproeven uitgevoerd, zoals in par. 3.2.7 toegelicht. Deze zijn 13-11-2020 uitgevoerd. De belasting is stapsgewijs verhoogd en verlaagd. Deze cyclus is 2 keer aansluitend uitgevoerd. De belastingstappen zijn in Tabel 4.1 weergegeven. De CWI op de metingen is voor elke belastingstap uitgevoerd, op basis van het rolling reference principe. De nabewerking van deze data is uitgevoerd en opgenomen in het rapport van (Fu, 2022). Relevante figuren hieruit zijn overgenomen in Figuur 4.6 en Figuur 4.7. In de figuren zijn grafisch de over elkaar gelegde signalen weergegeven. In Figuur 4.6 is over de lengte van het signaal de waarde van de dv/v en de CC uitgezet. In Figuur 4.7 zijn de resultaten samengevat in twee grafieken.

Tabel 4.1 Belastingstappen van de 2 cycli cilindertest

Belastingstap [nr.]	Kracht [kN]	Druk [N/mm ²]	Belastingstap [nr.]	Kracht [kN]	Druk [N/mm ²]
Cyclus 1			Cyclus 2 aansluitend		
1	700	9.90	16	1000	14.15
2	1000	14.15	17	1300	18.39
3	1300	18.39	18	1600	22.64
4	1600	22.64	19	1900	26.88
5	1900	26.88	20	2200	31.12
6	2200	31.12	21	2500	35.37
7	2500	35.37	22	2800	39.61
8	2800	39.61	23	2500	35.37
9	2500	35.37	24	2200	31.12
10	2200	31.12	25	1900	26.88
11	1900	26.88	26	1600	22.64
12	1600	22.64	27	1300	18.39
13	1300	18.39	28	1000	14.15
14	1000	14.15	29	700	9.90
15	700	9.90			



Figuur 4.6 CWI Cilinder 1 [L] en Cilinder 2 [R]. [Data verwerkt door (Fu, 2022)]



Figuur 4.7 Resultaten cumulatieve [L] en relatieve [R] dv/v belastingproef cilinders [(data verwerkt door (Fu, 2022))]

De toename van de dv/v vlak af naarmate de belasting toeneemt. Met name bij cilinder 2 is daarbij een duidelijk verschil waar te nemen tussen de 1^e en de 2^e belastingcyclus. De oorzaak hiervan kan het ontstaan van micro-scheurvorming zijn geweest gedurende het belastingproces. De resultaten van de CWI geven bij hogere belastingen een consistentere resultaat. Tevens laat de CC-waarde bij de start van de belastingprocedure en bij het ontlasten een lagere waarde zien ten opzichte van een hogere belasting. Ook hier kan de oorzaak worden gezocht in het ontstaan en openen van microscheurvorming. Dat (micro)scheurvorming effect heeft op het golfsnelheidsverschil en de CC-waarde is met laboratoriumonderzoek bevestigd (Kevinly, Zhang, Yang, Draganov, & Weemstra, 2021) en (Du, Yang, & Hordijk, 2019).

4.2.2 Kubussen

De kubussen welke zijn gestort tijdens de stort van het brugdek, zijn beproefd in het laboratorium van de TU Delft. De kubussen zijn gestort met hetzelfde mengsel als de brug en hebben de eerste 3 weken onder dezelfde condities in de buitenlucht naast de brug gelegen. Hierna zijn de kubussen naar de TU Delft vervoerd. De kubussen zijn 26-10-2020 beproefd, ca. 1.5 maand na de stort. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Resultaten kubussen

Kubus	Datum	Tijd	Snelheid belasting	Totale belasting	Druk
[nr.]	[dd.]		[kN/s]	[kN]	[N/mm ²]
1	26-10-20	10:10u	13.5	2016.2	89.61
2	26-10-20	10:25u	13.5	2010.1	89.34
3	26-10-20	10:40u	13.5	2027.2	90.10

De resultaten laten een behoorlijk hoge kubusdruksterkte zien van rond de 90 N/mm². De cilinderdruksterkte bedraagt hiermee ca. $0.8 \cdot 90 = 74$ N/mm² hetgeen wordt beschouwd als de gemiddelde cilinderdruksterkte f_{cm} . Om dit om te rekenen naar de karakteristieke

cilinderdruksterkte f_{ck} , dient hiervan nog 8 N/mm^2 te worden afgetrokken. De ontworpen betonsterkteklasse bedroeg C50/60.

4.3 Theoretisch spanningsniveau

Op basis van de uitgevoerde ontwerpberoeeningen (Boskalis Nederland, 2019) is voor de vier meetlocaties het spanningsniveau bepaald per meetmoment. Hiervoor zijn de (gesommeerde) momentenlijnen gebruikt zoals toegelicht in par. 3.2 en opgenomen in bijlage A. De krachtsverdeling ten gevolge van de voorspanning is berekend middels de belastingenmethode aangezien het een statisch onbepaalde constructie betreft. Er is gerekend met de betoneigenschappen op basis van een ongescheurde doorsnede. Dit wordt later nader geanalyseerd. De krachtsverdeling ten tijde van de metingen is opgebouwd uit de normaaldukracht van de voorspanning en het buigend moment onder eigen gewicht in combinatie met voorspanning. In Tabel 4.3 is de krachtsverdeling op de 4 posities samengevat. De krachtsverdeling is omgerekend naar spanningen in de uiterste vezel boven en onder. Een negatief moment betekent trek aan de bovenzijde van de doorsnede.

Omdat in de beschouwde fase de doorsnede ongescheurd is, kunnen de spanningen worden berekend met:

$$\sigma_{boven} = \frac{F}{A} - \frac{M}{W} \quad [4.1]$$

$$\sigma_{onder} = \frac{F}{A} + \frac{M}{W} \quad [4.2]$$

Tabel 4.3 Spanningen meetposities

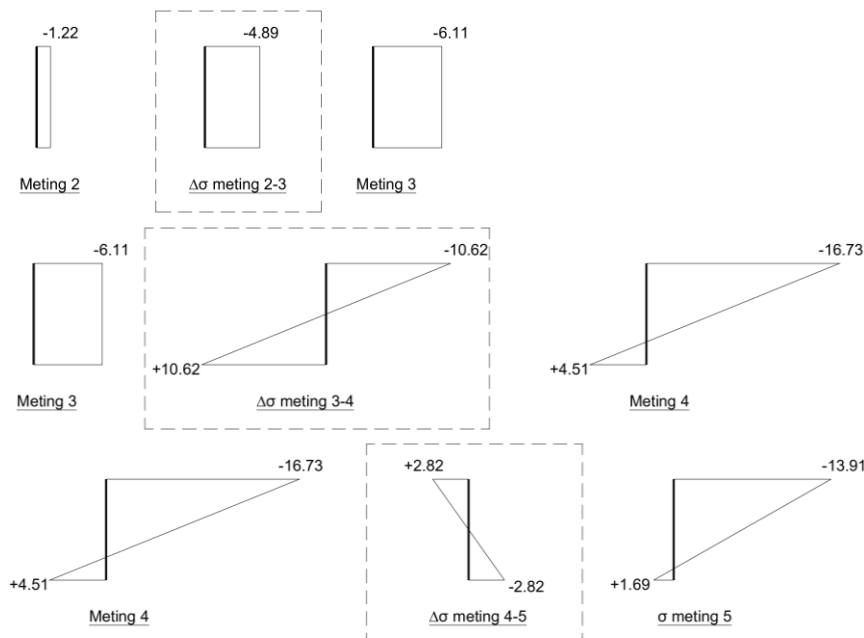
Locatie	Afstand tov landhoofd dx [m]	Hoogte doorsnede [mm]	Breedte doorsnede [mm]	Meting Id	Voorspanning	Situatie	N [kN/m]	M [kNm/m]	A [mm ²]	W [mm ³]	F/A [N/mm ²]	M/W [N/mm ²]	σ_{boven} [N/mm ²]	σ_{onder} [N/mm ²]
1	15,625	700	1000	Meting 2	20%	in kist	-1100	0	700000	81666667	-1,57	0,00	-1,57	-1,57
				Meting 3	100%	in kist	-5500	0			-7,86	0,00	-7,86	-7,86
				Meting 4	100%	ontkist	-5500	-233			-7,86	-2,86	-5,00	-10,71
				Meting 5	100%	stort 2 ontkist	-5500	-130			-7,86	-1,59	-6,27	-9,45
					100%	Brug gereed	-5500	-50			-7,86	-0,61	-7,24	-8,47
2	29,65	1270	1000	Meting 2	20%	in kist	-1200	0	1270000	268816667	-0,94	0,00	-0,94	-0,94
				Meting 3	100%	in kist	-6000	0			-4,72	0,00	-4,72	-4,72
				Meting 4	100%	ontkist	-6000	-1033			-4,72	-3,84	-0,88	-8,57
				Meting 5	100%	stort 2 ontkist	-6000	-833			-4,72	-3,10	-1,62	-7,82
					100%	Brug gereed	-6000	-560			-4,72	-2,08	-2,64	-6,81
3	55	900	1000	Meting 2	20%	in kist	-1100	0	900000	135000000	-1,22	0,00	-1,22	-1,22
				Meting 3	100%	in kist	-5500	0			-6,11	0,00	-6,11	-6,11
				Meting 4	100%	ontkist	-5500	1433			-6,11	10,62	-16,73	4,51
				Meting 5	100%	stort 2 ontkist	-5500	1053			-6,11	7,80	-13,91	1,69
					100%	Brug gereed	-5500	510			-6,11	3,78	-9,89	-2,33
4	64,1	1270	1000	Meting 2	20%	in kist	-1200	-140	1270000	268816667	-0,94	-0,52	-0,42	-1,47
				Meting 3	100%	in kist	-6000	1453			-4,72	5,41	-10,13	0,68
				Meting 4	100%	ontkist	-6000	1453			-4,72	5,41	-10,13	0,68
				Meting 5	100%	stort 2 ontkist	-6000	1083			-4,72	4,03	-8,75	-0,69
					100%	Brug gereed	-6000	373			-4,72	1,39	-6,11	-3,34

In de verdere analyse is ingezoomd op meetlocatie POS3. In bijlage F.1 zijn de spanningsfiguren van POS3 opgenomen. Hierin is over de hoogte van de doorsnede de aanwezige spanning bepaald en grafisch uitgezet.

Voor de analyse van de signalen wordt gebruikt gemaakt van het principe Rolling Reference, waarbij de CWI wordt uitgevoerd ten opzichte van het voorgaande signaal, de voorgaande meting. De verschillen tussen de metingen zijn dus benodigd. De verschillen van de meetmomenten op deze positie zijn weergegeven in Tabel 4.4 en Figuur 4.8.

Tabel 4.4 Verschilspanningen POS3

Locatie	Afstand tov landhoofd dx [m]	Hoogte doorsnede [mm]	Breedte doorsnede [mm]	Meting Id	σ		$\Delta\sigma_{\text{boven}}$			$\Delta\sigma_{\text{onder}}$		
					σ_{boven} [N/mm ²]	σ_{onder} [N/mm ²]	T.o.v. voorgaand [N/mm ²]	T.o.v. meting 2 [N/mm ²]	T.o.v. meting 3 [N/mm ²]	T.o.v. voorgaand [N/mm ²]	T.o.v. meting 2 [N/mm ²]	T.o.v. meting 3 [N/mm ²]
3	55	900	1000	Meting 2	-1,22	-1,22						
				Meting 3	-6,11	-6,11	-4,89	-4,89		-4,89	-4,89	
				Meting 4	-16,73	4,51	-10,62	-15,51	-10,6	10,62	5,73	10,6
				Meting 5	-13,91	1,69	2,81	-12,69	-7,8	-2,81	2,91	7,8
					-9,89	-2,33						



Figuur 4.8 Verschilspanningen POS3

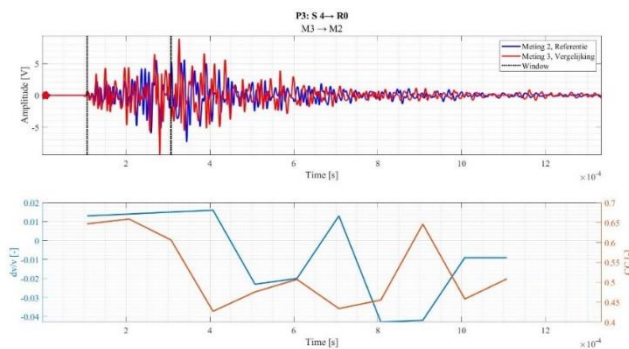
Naast de verschillen ten opzichte van de voorgaande meting, zijn nog 2 verschilspanningen interessant geacht, namelijk voor de bovenzijde de meting 5 ten opzichte van meting 2 en voor de onderzijde meting 5 ten opzichte van meting 3. De verschilspanningen laten namelijk een groot negatief verschil zien ten opzichte wanneer deze metingen op basis van rolling reference worden vergeleken (boven: +2.8 N/mm² ten opzichte van -12.7 N/mm², onder: -2.8 N/mm² ten opzichte van +7.8 N/mm²). In de analyse wordt aanvullend bekeken of dit verschil terug te zien is met de CWI van de metingen.

4.4 Resultaten Coda Wave Interferometry Meetlocatie POS3

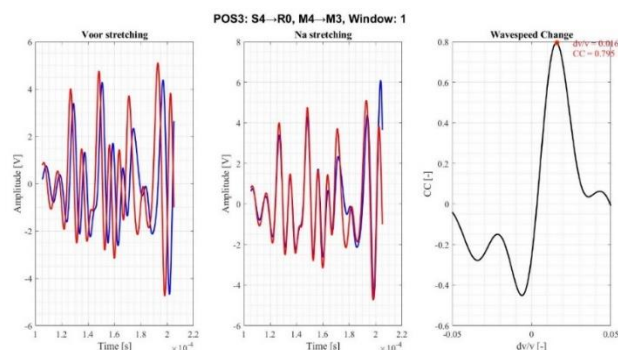
In dit onderzoek is de analyse van de metingen uitgevoerd voor meetlocatie POS3. Bij een analyse met behulp van CWI, wordt in principe de staart van het signaal onderzocht welke de langste weg heeft afgelegd en daarmee de meeste informatie heeft verzameld. In dit praktijkonderzoek betekent dit echter ook veel mogelijke verstoringen van het signaal; aanwezigheid van wapening, voorspanbuizen, HWA-buizen, microscheurvorming etc. Bij het verwerken van de data is gebleken dat de kwaliteit van de CWI van deze latere aankomsten niet van een hoge, betrouwbare kwaliteit zijn. In deze fase van het onderzoek is daarom gefocust op het 1^e en het 2^e tijdvenster van het signaal. Dit zijn dus de eerdere aankomsten welke de meest directe weg hebben afgelegd tussen de sensoren. De eerste meting is zo kort na aanbrengen van het beton uitgevoerd, dat deze meting een te verstoord beeld geeft. De ultrasone golven werden door het nog hoge waterpercentage in het beton beïnvloed. De CWI-analyse is uitgevoerd vanaf de tweede meting.

De CWI wordt met behulp van het verwerkingsprogramma grafisch weergegeven in een drietal diagrammen, te weten:

1. Totaalbeeld van de twee te beschouwen metingen (Figuur 4.9, boven).
2. CWI over de gehele tijdspanne van het signaal. Geplot is dv/v en de CC-waarde (Figuur 4.9, onder).
3. Detailweergave van het gevraagde tijdvenster. Hierin wordt de betreffende dv/v aangegeven bij de maximale CC-waarde (Figuur 4.10).

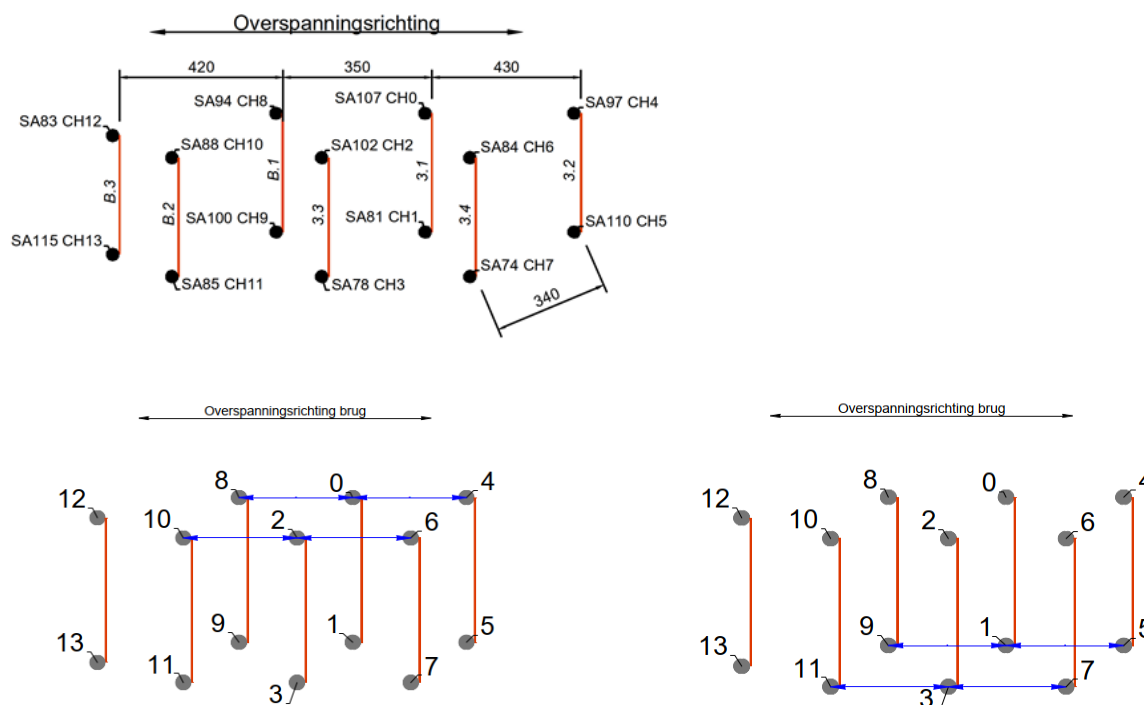


Figuur 4.9 CWI van de metingen



Figuur 4.10 Detailweergave tijdvenster

De CWI is uitgevoerd voor de sensoren welke in de overspanningsrichting van de brug in lijn met elkaar staan. De CWI is in beide richtingen uitgevoerd waarbij de sensoren dus zowel een actieve, sturende, als een passieve, ontvangende, rol kunnen hebben. Op POS3 zijn 2x3 meetstokken in lijn geïnstalleerd. Naast de CWI van de direct tegenover elkaar gelegen sensoren, wordt ook CWI uitgevoerd tussen de sensoren van de buitenste meetstokken. In Figuur 4.11 is het schema van de sensoren ter plaatse van positie 3 weergegeven met de Kanaal-Id's van de MUX-boxen. Met blauwe pijlen is de uitgevoerde CWI aangegeven.



Figuur 4.11 Positie 3 - schema sensoren met CH-Id [Boven]. Schema uitgevoerde CWI POS 3 [Onder]

In eerste instantie is alleen het eerste tijdvenster beschouwd. Omdat de resultaten fluctueren, is vervolgens ook van het 2^e tijdvenster de CWI uitgevoerd. De resultaten van de CWI van Meetlocatie Positie 3 is samengevat in Tabel 4.5 tot en met Tabel 4.8. Hierin is de berekende verschilspanning tussen de metingen te zien met de dv/v en de bijbehorende Correlatiecoëfficiënt.

In bijlage H is een selectie van de resultaten (grafische weergaven) van de uitgevoerde CWI van meetlocatie POS3 opgenomen.

Tabel 4.5 Positie 3, CWI bovenzijde, Tijdvenster 1

POS 3 - bovenzijde		Meting 2 20% vsp	Meting 3 100% vsp	Meting 4 Fase 1 ontkist	Meting 5 Fase 2 ontkist	Resultaten CWI Tijdvenster 1											
Zender	Ontvanger	21-9-2020 ID _{CH} [-]	25-9-2020 ID _{CH} [-]	30-10-2020 File Idnr.	17-12-2020 File Idnr.	Meting 3->2			Meting 4->3			Meting 5->4			Meting 5->2		
						$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	CC [-]	dv/v [-]	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	CC [-]	dv/v [-]	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	CC [-]	dv/v [-]	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	CC [-]	dv/v [-]
4	0	1693	1742	1771	1889	-4,89	0,647	0,013	-10,62	0,795	0,016	2,81	0,917	0,003	-12,69	0,601	0,03
0	4	1689	1738	1767	1885		0,620	0,013		0,627	0,017		0,834	0,002		0,552	0,029
0	8	1689	1738	1767	1885		0,847	0,012		0,969	0,016		0,922	0,005		0,785	0,032
8	0	1697	1746	1775	1893	-4,89	0,679	0,022	-10,62	0,756	0,015	2,81	0,812	0,001	-12,69	0,637	0,035
6	2	1695	1744	1773	1891		0,616	0,014		0,864	0,017		0,774	0,004		0,682	0,034
2	6	1691	1740	1769	1887	-4,89	0,872	0,015	-10,62	0,948	0,016	2,81	0,887	0,005	-12,69	0,773	0,038
2	10	1691	1740	1769	1887		0,638	0,019		0,869	0,016		0,860	0,002		0,498	0,036
10	2	1699	1748	1777	1895	-4,89	0,564	0,029	-10,62	0,863	0,018	2,81	0,773	0,000	-12,69	0,57	0,045
4	8	1693	1742	1771	1889		0,824	0,016		0,928	0,016		0,942	0,001		0,702	0,035
8	4	1697	1746	1775	1893	-4,89	0,577	0,018	-10,62	0,801	0,016	2,81	0,841	0,001	-12,69	0,819	0,034
6	10	1695	1744	1773	1891		0,877	0,016		0,890	0,017		0,888	0,004		0,655	0,038
10	6	1699	1748	1777	1895	-4,89	0,630	0,021	-10,62	0,892	0,018	2,81	0,836	0,004	-12,69	0,531	-0,030
Gemiddelde							0,699	0,0173		0,850	0,0165		0,857	0,0027		0,650	0,0297

Tabel 4.6 Positie 3, CWI bovenzijde, Tijdvenster 2

POS 3 - bovenzijde		Meting 2 20% vsp	Meting 3 100% vsp	Meting 4 Fase 1 ontkist	Meting 5 Fase 2 ontkist	Resultaten CWI Tijdvenster 2											
Zender	Ontvanger	21-9-2020 ID _{CH} [-]	25-9-2020 ID _{CH} [-]	30-10-2020 File Idnr.	17-12-2020 File Idnr.	Meting 3->2			Meting 4->3			Meting 5->4			Meting 5->2		
						$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	CC [-]	dv/v [-]	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	CC [-]	dv/v [-]	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	CC [-]	dv/v [-]	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	CC [-]	dv/v [-]
4	0	1693	1742	1771	1889	-4,89	0,659	0,014	-10,62	0,733	0,017	2,81	0,888	0,003			
0	4	1689	1738	1767	1885		0,515	0,012		0,562	0,017		0,758	0,001			
0	8	1689	1738	1767	1885	-4,89	0,478	0,012	-10,62	0,917	0,016	3,21	0,855	0,005			
8	0	1697	1746	1775	1893		0,405	0,02		0,528	0,016		0,647	0,003			
6	2	1695	1744	1773	1891	-4,89	0,606	0,013	-10,62	0,864	0,016	3,21	0,708	0,004			
2	6	1691	1740	1769	1887		0,79	0,014		0,845	0,017		0,77	0,005			
2	10	1691	1740	1769	1887	-4,89	0,582	0,019	-10,62	0,709	0,017	3,21	0,829	0,002			
10	2	1699	1748	1777	1895		0,387	0,026		0,753	0,019		0,574	0,000			
4	8	1693	1742	1771	1889	-4,89	0,742	0,014	-10,62	0,802	0,016	3,21	0,874	0,003			
8	4	1697	1746	1775	1893		0,725	0,015		0,606	0,016		0,804	0,002			
6	10	1695	1744	1773	1891	-4,89	0,847	0,015	-10,62	0,702	0,016	3,21	0,892	0,005			
10	6	1699	1748	1777	1895		0,772	0,016		0,772	0,016		0,767	0,003			
Gemiddelde							0,626	0,0158		0,733	0,0166		0,781	0,0030			

Tabel 4.7 Positie 3, CWI onderzijde, Tijdvenster 1

POS 3 - onderzijde		Meting 2 20% vsp	Meting 3 100% vsp	Meting 4 Fase 1 ontkist	Meting 5 Fase 2 ontkist	Resultaten CWI Tijdvenster 1											
Zender	Ontvanger	21-9-2020 ID _{CH} [-]	25-9-2020 ID _{CH} [-]	30-10-2020 File Idnr.	17-12-2020 File Idnr.	Meting 3->2			Meting 4->3			Meting 5->4			Meting 5->3		
						$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	CC [-]	dv/v [-]	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	CC [-]	dv/v [-]	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	CC [-]	dv/v [-]	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	CC [-]	dv/v [-]
5	1	1694	1743	1772	1890	-4,89	0,431	0,012	10,62	0,687	-0,002	-2,81	0,852	0,007	7,8	0,726	0,006
1	5	1690	1739	1768	1886		0,445	0,024		0,627	-0,006		0,914	0,009		0,598	0,004
1	9	1690	1739	1768	1886	-4,89	0,334	0,03	10,62	0,370	-0,007	-2,81	0,555	0,015	7,8	0,456	0,004
9	1	1698	1747	1776	1894		0,193	0,04		0,227	0		0,729	0,008		0,461	0,008
7	3	1696	1745	1774	1892	-4,89	0,284	0,013	10,62	0,284	0,003	-2,81	0,869	0,012	7,8	0,345	0,011
3	7	1692	1741	1770	1888		0,660	0,015		0,682	0,001		0,951	0,007		0,760	0,009
3	11	1692	1741	1770	1888	-4,89	0,252	0,012	10,62	0,422	-0,003	-2,81	0,754	0,007	7,8	0,686	0,005
11	3	1700	1749	1778	1896		0,283	0,017		0,328	-0,006		0,910	0,009		0,349	0,002
5	9	1694	1743	1772	1890	-4,89	0,595	0,018	10,62	0,674	-0,001	-2,81	0,798	0,007	7,8	0,820	0,006
9	5	1698	1747	1776	1894		0,239	0,042		0,236	0,002		0,793	0,007		0,505	0,006
7	11	1696	1745	1774	1892	-4,89	0,497	0,019	10,62	0,725	-0,003	-2,81	0,961	0,008	7,8	0,757	0,005
11	7	1700	1749	1778	1896		0,783	0,017		0,889	-0,001		0,957	0,008		0,923	0,007
Gemiddelde							0,416	0,0216		0,513	-0,0019		0,837	0,0087		0,616	0,0061

Tabel 4.8 Positie 3, CWI onderzijde, Tijdvenster 2

POS 3 - onderzijde		Meting 2 20% vsp	Meting 3 100% vsp	Meting 4 Fase 1 ontkist	Meting 5 Fase 2 ontkist	Resultaten CWI Tijdvenster 2											
Zender	Ontvanger	21-9-2020 ID _{CH} [-]	25-9-2020 ID _{CH} [-]	30-10-2020 File Idnr.	17-12-2020 File Idnr.	Meting 3->2			Meting 4->3			Meting 5->4			Meting 5->2		
						$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	CC [-]	dv/v [-]	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	CC [-]	dv/v [-]	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	CC [-]	dv/v [-]	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	CC [-]	dv/v [-]
5	1	1694	1743	1772	1890	-4,89	0,269	-0,023	10,62	0,554	-0,004	-2,81	0,782	0,009			
1	5	1690	1739	1768	1886		0,381	0,021		0,501	-0,004		0,886	0,008			
1	9	1690	1739	1768	1886	-4,89	0,213	-0,022	10,62	0,267	0,042	-2,81	0,493	0,015			
9	1	1698	1747	1776	1894		0,256	0,042		0,170	-0,02		0,558	0,007			
7	3	1696	1745	1774	1892	-4,89	0,324	0,011	10,62	0,261	0,004	-2,81	0,571	0,007			
3	7	1692	1741	1770	1888		0,392	0,014		0,547	0,001		0,947	0,007			
3	11	1692	1741	1770	1888	-4,89	0,288	-0,02	10,62	0,291	0,039	-2,81	0,778	0,007			
11	3	1700	1749	1778	1896		0,276	0,012		0,120	-0,038		0,821	0,009			
5	9	1694	1743	1772	1890	-4,89	0,361	0,016	10,62	0,292	-0,034	-2,81	0,603	0,005			
9	5	1698	1747	1776	1894		0,507	0,009		0,438	0,006		0,881	0,006			
7	11	1696	1745	1774	1892	-4,89	0,311	0,016	10,62	0,553	0,001	-2,81	0,93	0,007			
11	7	1700	1749	1778	1896		0,527	0,013		0,63	0,002		0,953	0,007			
Gemiddelde							0,342	0,0074		0,385	-0,0004		0,767	0,0078			

In de tabellen zijn de resultaten met een lage (<0.5) CC rood gearceerd. In laboratoriumonderzoek wordt gebruikelijk gestreefd naar een CC-waarde van minimaal 0.8 om als betrouwbaar resultaat te worden gezien. In dit onderzoek is echter een CC-waarde van 0.5 aangehouden omdat de kwaliteit van de resultaten van de metingen van deze praktijksituatie veel grilliger zijn dan die van een laboratoriumonderzoek.

4.5 Analyse resultaten CWI

Uit de resultaten zoals opgenomen in Tabel 4.5 tot en met Tabel 4.8. zijn een aantal zaken te benoemen die opvallen ofwel afwijken van hetgeen wat was te verwachten. In deze paragraaf worden deze benoemd en voorzien van een argumentatie of een en ander is te verklaren.

De CC-waarde van de CWI van meting 3 ten opzichte van meting 2 en ook van meting 4 ten opzichte van meting 3 is aan de onderzijde relatief laag. Een groot deel van deze resultaten zijn op basis van de CC-waarde niet betrouwbaar. De sensoren aan de bovenzijde van de constructie laten een betrouwbaarder resultaat zien. Waarom juist de metingen aan de onderzijde in deze periode zo'n onbetrouwbaar beeld geven, is niet direct duidelijk. Een verklaring kan mogelijk worden gezocht in de bekiste onderzijde ten opzichte van de onbekiste bovenzijde. Het hydratatieproces van het beton (wat een grote invloed heeft op de CWI) is aan de bovenzijde wellicht verder gevorderd ten opzichte van de onderzijde. Doordat de metingen veel van elkaar afwijken, ontstaat daarbij het effect van cycle skipping (zie par. 4.1.2). In grafieken zoals opgenomen in bijlage H is veel fluctuatie van de dv/v te zien over de lengte van het tijdspad. Aan de onderzijde lijkt deze cycle skipping, fluctuatie, sterker te zijn dan aan de bovenzijde. Ondanks het feit dat in principe in deze studie alleen is gekeken naar de eerste tijdvensters, zijn de overeenkomsten van de signalen toch erg verschillend.

Van de meetstap van 20% voorspanning naar 100% voorspanning is theoretisch een gelijkmatige verschilspanning over de hoogte van de doorsnede te verwachten. De gevonden dv/v is aan de bovenzijde lager dan aan de onderzijde. Wanneer de meetresultaten met een onbetrouwbare CC-waarde buiten beschouwing worden gelaten, is de dv/v aan de bovenzijde iets hoger dan de dv/v aan de onderzijde. Dit is in het 2^e tijdvenster iets duidelijker waar te nemen. In de volgende paragraaf is de invloed van de ondersteuning beschouwd. Een verschil van de dv/v tussen de bovenzijde en de onderzijde van de constructie wordt hiermee verklaard.

Bij meting 4->3 "bovenzijde" wordt een grotere toename van de drukspanning verwacht dan bij meting 3->2. De dv/v is echter ordegrrootte gelijk aan elkaar. De resultaten van de drukproef van de cilindertests toont aan dat het golfsnelheidsverschil niet lineair verloopt met de spanning. Bij toenemende spanning, wordt de toename van de dv/v kleiner.

Bij meting 4->3 "onderzijde" wordt een omslag naar een trekspanning verwacht. Er is slechts een kleine negatieve dv/v te zien. In deze periode is ook sprake van een grote ontwikkeling van de E-modulus. Wordt gekeken naar meting 4 met als referentie meting 2, dan is zelfs een positieve dv/v te zien. Dit bevestigt het beeld dat een ontwikkeling van de E-modulus een grotere golfsnelheid geeft. Bovendien is de onderzijde van het dek een bekist vlak. Hydratie,

vochtuittreding, gaat aan deze zijde langzamer dan aan de bovenzijde. Na het ontkisten zal dit proces zich versnellen, wat invloed heeft op dv/v . Dit geeft een toename van de golfsnelheid.

Voor meting 5->4 “bovenzijde” is een positieve dv/v te zien waar op basis van de kleine verschil-trekspanning een negatieve dv/v te verwachten was. Het resultaat is echter wel een heel kleine waarde voor de dv/v . Dit is mogelijk met de locatie van de sensoren ten opzichte van de uiterste vezel al te verklaren.

Bij de CWI waarbij meting 5 met meting 2 is vergeleken aan de bovenzijde van de constructie is een relatief hoge waarde van de dv/v te zien. Dit is gezien de grote belastingstap te verwachten. Maar ook de hydratatieontwikkeling is in deze relatief lange periode uiteraard groot geweest en heeft daarmee veel invloed op de dv/v . De metingen tonen daarbij een erg fluctuerend beeld.

Voor meting 5->3 aan de onderzijde wordt op basis van de verschil-trekspanning een negatieve dv/v verwacht, maar er wordt een kleine positieve waarde van dv/v gevonden. Ook hierin zullen de hydratatie-effecten de overhand gehad kunnen hebben.

In het algemeen kan gezegd worden dat (relatieve) trekspanningen lastiger te detecteren zijn geweest dan drukspanningen.

4.6 Beschouwing beïnvloeding metingen

Het beeld van de resultaten is niet direct 1 op 1 te vergelijken met de theoretische spanningen vanuit het rekenmodel. In deze paragraaf is een aantal scenario's onderzocht en beargumenteerd, welke invloed hebben gehad op de bepaling van de spanningen, of invloed hebben op de metingen zelf.

4.6.1 Hydratatie

Bij de bevindingen is de invloed van het hydratatieproces op de resultaten reeds als verklaring benoemd. Het hydratatieproces van beton geeft grote wijzigingen in o.a. de E-modulus en de vochtuishouding van de constructie. Beide eigenschappen hebben een grote invloed op de dv/v . Bij toename van de E-modulus neemt de dv/v cumulatief in absolute zin toe. De grootte van toename vlakkt af in de tijd. Dit effect is bevestigd met de cilinderproeven. Een kwantitatief effect is voor dit onderzoek niet te trekken. De gebruikte cilinders zijn van een andere betonsamenstelling gemaakt en zijn onder andere omstandigheden verhard.

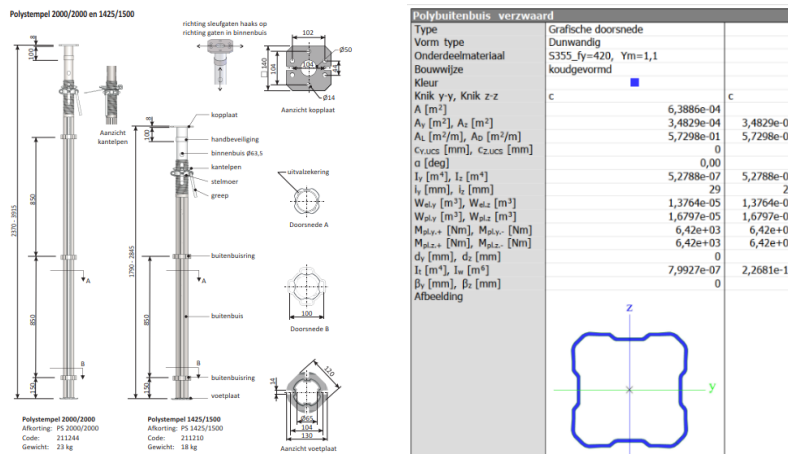
4.6.2 Invloed ondersteuning

De resultaten van de CWI van meting 3 ten opzichte van meting 2 laten zowel aan de onderzijde als aan de bovenzijde een positieve dv/v zien. Dit is te verwachten aangezien in deze fase de voorspanning van 20% naar 100% is gespannen. Het dek ligt nog in de bekisting. In de theoretische spanningsniveaus is uitgegaan van een gelijkmatige spanningsverdeling

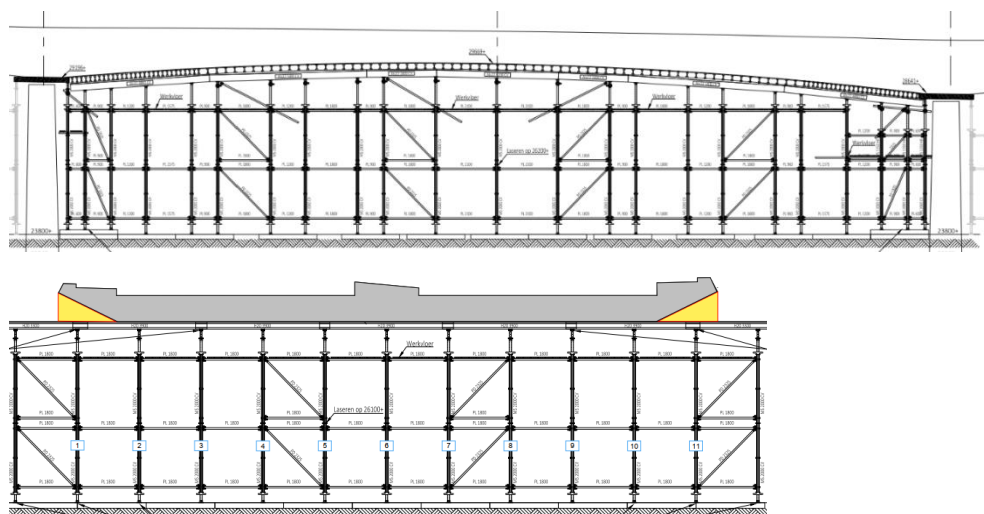
over de doorsnede. Is dit te verklaren door de invloed van de bekisting tijdens het spannen van het dek?

Om dit te onderzoeken is een aanvullende beschouwing gemaakt van de bekiste fase. Hiervoor is een ligger rekenmodel opgezet. De ondersteuning is gemodelleerd als een lijnondersteuning op de staafelementen met als eigenschap dat deze enkel flexibele druk kan opnemen. Omdat de ondersteuning enkel druk kan opnemen, is een niet-lineaire berekening uitgevoerd. De flexibele druk representeert de veerstijfheid van de ondersteuningsconstructie en de ondergrond waar deze op staat. De veerstijfheid van dit systeem is berekend op basis van de toegepaste materialen en is navolgend nader toegelicht.

De ondersteuningsconstructie van het dek is opgebouwd uit een poly-ondersteuning van stalen stempels volgens Figuur 4.12. Deze stempels zijn in een vierkant grid opgetrokken waarop de onderkist van het dek is gebouwd waarvan het principe is weergegeven in Figuur 4.13.



Figuur 4.12 Polystempel



Figuur 4.13 Principe dwars- [B] en langsdoorsnede [O] ondersteuning dekconstructie

De veerwaarde k per stempel wordt bepaald door te berekenen hoeveel kracht er nodig is om de stempel een eenheid ΔL te doen verkorten, zoals weergegeven formule 4.3:

$$k = \frac{F}{\Delta L} \quad [4.3]$$

Hierin is:

k = veerstijfheid

F = kracht

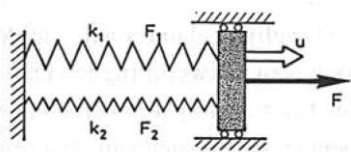
ΔL = verkorting

De veerwaarde per stempel is stapsgewijs in Tabel 4.9 bepaald.

Tabel 4.9 Veerwaarde stempel ondersteuning

	Symbool	Eenheid	Grootte	Omschrijving
Belasting	F	[N]	1000	Eenheidslast
Hoogte	h	[mm]	5400	Gemiddelde hoogte aangehouden
Elasticiteitsmodulus	E_{staal}	[N/mm ²]	210000	
Doorsnede	A	[mm ²]	639	
Spanning	σ	[N/mm ²]	1,56	$\sigma = F/A$
Verkorting	ε	[-]	7E-06	$\varepsilon = \sigma / E$
Verkorting	ΔL	[mm]	4E-02	$\Delta L = \varepsilon * h$
Veerwaarde	k_{st}	[MN/m]	24,85	$K = F / \Delta L$

De veerwaarde k_{st} per stempel bedraagt 24,85 MN/m. Voor de totale veerwaarde fungeren alle stempels als een veer-parallelstelsel zoals geschematiseerd in Figuur 4.14 (uit (Bouma, 2000)).



Figuur 4.14 Veermodel Parallelsysteem

In een parallelsysteem geldt voor de totale veerwaarde de sommatie van alle veerwaarden. Per overspanning zijn in dwarsrichting 11 stempels en in de overspanningsrichting 22 stempels toegepast. Het totale veersysteem heeft voor 1 overspanning een veerwaarde k van:

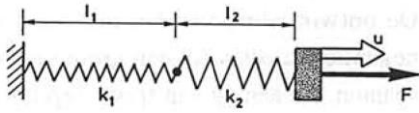
$$k_{\text{ondersteuning}} = 11 * 22 * 24.85 = 6.014 \text{ MN/m}$$

De ondersteuningsconstructie is opgebouwd op stelconplaten welke op een goed verdicht zandbed zijn uitgelegd. De stelconplaten zijn als oneindig stijf beschouwd. Voor het verdichte zandbed wordt een stijfheid aangenomen van 20 MN/m³. De oppervlakte van de ondersteuning

bedraagt ca. $b \times L = 18 \times 29\text{m}$ per overspanning. De totale veerstijfheid van de ondergrond bedraagt per overspanning:

$$k_{\text{zand}} = 20 \times 18 \times 29 = 10.440 \text{ MN/m}$$

Het veersysteem van de ondersteuningsconstructie samen met de zandbedding is in serie geschakeld zoals geschematiseerd in Figuur 4.15 (uit (Bouma, 2000)).



Figuur 4.15 Veersysteem seriesysteem

De totale veerstijfheid van het systeem van een seriesysteem bedraagt:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad [4.4]$$

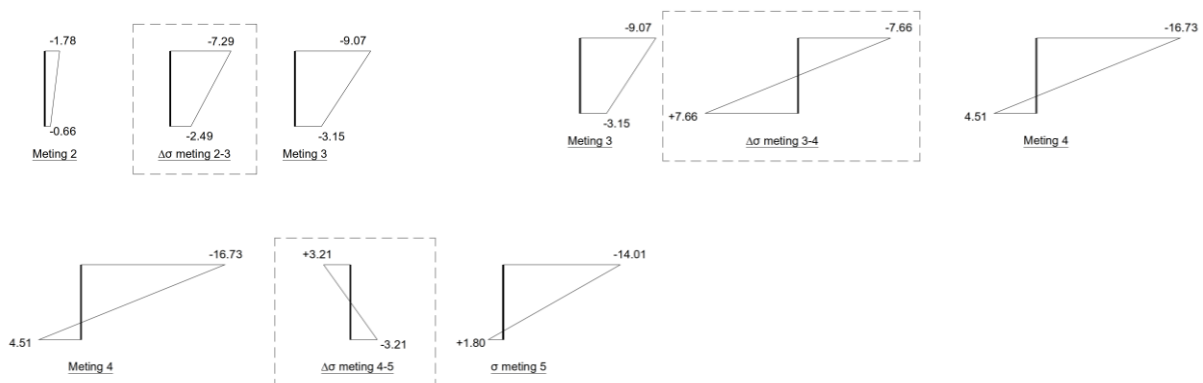
De totale veerstijfheid bedraagt per overspanning:

$$\frac{1}{k_T} = \frac{1}{k_{\text{ondersteuning}}} + \frac{1}{k_{\text{zand}}} = \frac{1}{6014} + \frac{1}{10440}$$

De totale veerstijfheid bedraagt:

$$k_T = 3815 \text{ MN/m}$$

De veerstijfheid is als lijnondersteuning gemodelleerd welke alleen druk kan opnemen. De verticale veerstijfheid heeft een waarde van $k_T = 3815 / 29 \text{ m} = 132 \text{ MN/m/m}$. Ter hoogte van positie 3 is de krachtsverdeling uitgelezen. Deze bedraagt op het moment van 20% voorspanning ca. 75 kNm/m en op het moment van 100% voorspanning: 400 kNm/m. De spanningsfiguren zijn hiermee opnieuw bepaald, zie bijlage F.2. De verschillen tussen de metingen zijn in Figuur 4.16 weergegeven.



Figuur 4.16 Verschillen spanningen inclusief invloed ondersteuning

De invloed van de ondersteuning is terug te zien in de verschillingspanningen tussen meting 3->2 en meting 4->3. Bij meting 3->2 is een hogere drukspanning te verwachten aan de bovenzijde in plaats van het eerder aangenomen gelijkmatig verdeelde spanningsverschil over de hoogte van de doorsnede. Dit verklaart het verschil in de resultaten van de metingen tussen de boven- en onderzijde van de constructie. Voor het spanningsverschil tussen meting 4->3 wordt een gelijke verdeling gevonden als eerder aangenomen, echter met iets lagere waarden.

4.6.3 Invloed dwarskracht

Dit onderzoek heeft zich beperkt tot de P-Waves. Een mogelijke invloed van dwarskracht op de metingen is niet beschouwd. Uit onderzoek (Kevinly, Zhang, Yang, Draganov, & Weemstra, 2021) is gebleken dat CWI ook gevoelig is voor dwarskracht(scheuren). In deze paragraaf is onderzocht of een dwarskracht invloed kan hebben gehad op de metingen ter plaatse van de onderzochte meetlocatie. De sensoren zijn niet in de uiterste vezels geplaatst, maar wel zo dicht als mogelijk binnen de wapening. De maximale schuifspanning in een doorsnede treedt echter op in het hart van de doorsnede.

Aan de hand van de bekende krachtsverdeling nabij positie 3 is een analyse gemaakt van de spanningstoestand inclusief de dwarskracht. Aan de hand van de richting van de hoofdspansingen wordt gekeken of de dwarskracht invloed heeft in het gebied van de metingen. De geanalyseerde krachtsverdeling ter plaatse van de meetlocatie is samengevat in Tabel 4.10 inclusief de lokaal aanwezige dwarskracht (uit het ontwerprapport (Boskalis Nederland, 2019)).

Tabel 4.10 Resume krachtsverdeling positie 3

	F [kN/m]	M _y [kNm/m]	V _z [kN/m]
Meting 2	-1100	75 ¹⁾	20 ¹⁾
Meting 3	-5500	400 ¹⁾	225 ¹⁾
Meting 4	-5500	1433	55
Meting 5	-5500	1053	35

1) krachtsverdeling uit niet-lineaire analyse inclusief verende ondersteuning bekisting.

De normaalspanning is bepaald volgens formules 4.1 en 4.2.

De schuifspanning is over de hoogte van de doorsnede berekend middels de formule:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} * S}{b * I} \quad [4.5]$$

Hierin is:

V_{ed} = Dwarskracht [N]

S = Statisch moment [mm³]

b = Breedte [mm]

I = Traagheidsmoment [mm⁴]

Het Statisch Moment S wordt over de hoogte van de doorsnede bepaald door:

$$S = A * y_z \quad [4.6]$$

Hierin is:

A = het afgeschoven oppervlakte is [mm²]

y_z = de afstand van het zwaartepunt van het afgeschoven oppervlak tot het zwaartepunt van de doorsnede [mm]

Met behulp van de Cirkel van Mohr is de spanningstoestand geanalyseerd waarbij gekeken is in hoeverre de hoofdspansingen afwijken van de richting van de sensoren. Om de cirkel van Mohr te construeren zijn de hoofdspansingen benodigd. De formules van de hoofdspansingen zijn:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad [4.7]$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad [4.8]$$

Hierin is:

σ_1 = Maximale hoofdspanning [N/mm²]

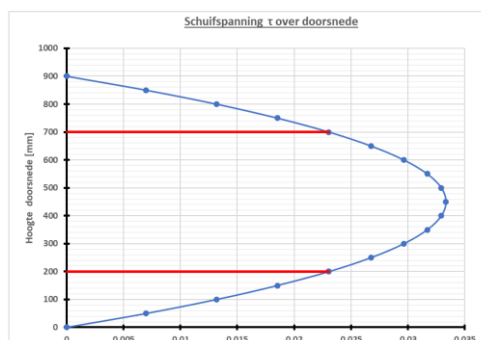
σ_2 = Minimale hoofdspanning [N/mm²]

σ_x = Normalspanning in x-richting [N/mm²]

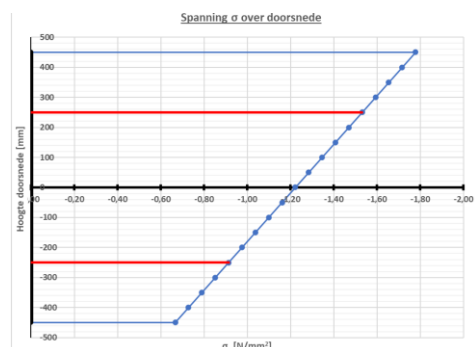
σ_y = Normalspanning in y-richting [N/mm²]

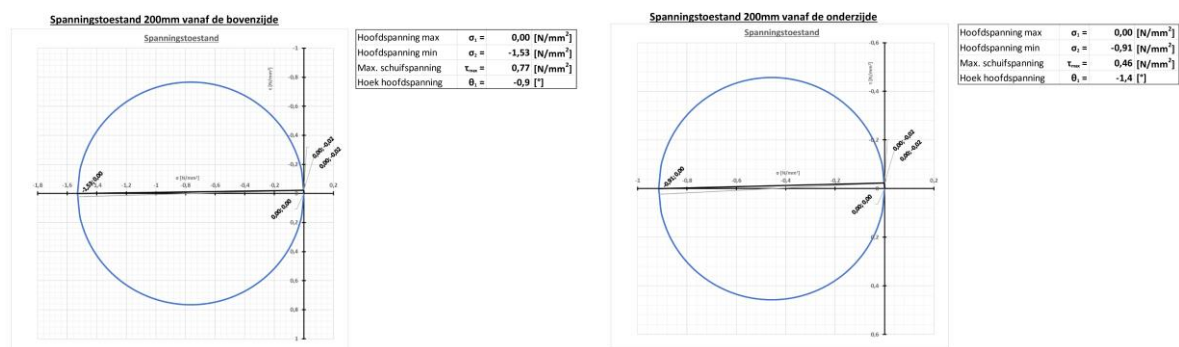
τ_{xy} = Schuifspanning [N/mm²]

De sensoren zijn binnen de wapening gemonteerd. De spanningstoestand is daarom bepaald op 200mm ten opzichte van de buitenzijde van de constructie. De spanningsfiguren en de spanningstoestand van meting 2 zijn weergegeven in Figuur 4.17 en Figuur 4.18.



Figuur 4.17 Spanningen POS3, meting 2





Figuur 4.18 Spanningstoestand POS3, meting 2

De spanningsfiguren en -toestand van de overige metingen zijn opgenomen in bijlage F.2. De hoofdspanningen zijn samengevat in Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Spanningstoestand meetlocatie POS3

	Maximale hoofdspanning	Minimale hoofdspanning	Verdraaiingshoek hoofdspanning
	σ_1 [N/mm ²]	σ_2 [N/mm ²]	[°]
Meting 2 boven	0.00	-1.53	-0.9
Meting 2 onder	0.00	-0.91	-1.4
Meting 3 boven	0.01	-7.7	-1.9
Meting 3 onder	0.02	-4.48	-3.3
Meting 4 boven	0.00	-12.01	-0.3
Meting 4 onder	0.02	-0.23	-15.3
Meting 5 boven	0.00	-10.44	-0.2
Meting 5 onder	0.00	-1.78	-1.3

Te zien is dat op positie 3 de invloed van de schuifspanningen heel erg klein is in deze fase. Om het elementje dusdanig te draaien dat er alleen hoofdspanningen op het elementje werken, is slechts een beperkte rotatie benodigd. De sensoren staan in dit gebied dus nagenoeg in lijn met de te verwachten hoofdspanningen in deze fase.

Daarbij is te concluderen dat de hoofdtrekspanning ca. 0.0 N/mm² bedraagt. Vanuit de spanningscirkel is scheurvorming ten gevolge van de optredende spanningen niet te verwachten.

In de uiterste vezel aan de onderzijde van meting 4 overschrijdt de normaalspanning de gemiddelde waarde van de treksterkte van het beton $f_{ctm} = 4.1$ N/mm² heen. Het is niet ondenkbaar dat hier lokaal het scheurmoment is overschreden en microscheurvorming is ontstaan welke wel invloed hebben gehad op de dv/v.

Het voornoemde onderzoek (Kevinly, Zhang, Yang, Draganov, & Weemstra, 2021) heeft een relatie gelegd tussen het ontstaan van scheurvorming (ten gevolge van dwarskracht) en een plotselinge reductie van de CC-waarde. Uit de hier uitgevoerde analyse blijkt dat er geen wijde/grote scheuren te verwachten zijn. Deze zijn in de praktijk ook niet gesignaleerd. De CC-waarde loopt daarbij over het algemeen op over de verschillende meetmomenten bezien. De

invloed van de dwarskracht lijkt hiermee geen grote invloed te hebben gehad op de resultaten van de metingen.

4.6.4 Ontwikkeling elasticiteitsmodulus

In de bepaling van de spanningen op de meetlocaties is uitgegaan van de betoneigenschappen op basis van een ongescheurde doorsnede met een constante elasticiteitsmodulus. In werkelijkheid zal de elasticiteitsmodulus zich gedurende het hydratatieproces blijven ontwikkelen. Daarbij is de betonsterkteklasse in de praktijk hoger uitgevallen dan waarvan is uitgegaan. Om dit nader te onderzoeken is voor meetlocatie POS3 voor de verschillende bouwfasen een M-N-K-diagram opgesteld waaruit voor de betreffende situatie een nauwkeurigere benadering van de werkelijke elasticiteitsmodulus is af te leiden. De M-N-K-diagrammen zijn opgesteld voor de meetmomenten 2 tot en met 5 op basis van de rekenwaarden van de te verwachten betoneigenschappen op dat moment.

Meting 2 is uitgevoerd na het aanbrengen van de 20% voorspanning. De meting is uitgevoerd toen het dek zo'n 10 dagen oud was. De druksterkte van beton op ouderdom t kan worden geschat met formule 3.1 uit de NEN-EN 1992-1-1:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) * f_{cm} \quad [4.9]$$

Hierin is:

f_{cm} = gemiddelde waarde betondruksterkte [N/mm²]

β_{cc} = coëfficiënt afhankelijk van de ouderdom van het beton:

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s * \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad [4.10]$$

De coëfficiënt s hangt af van de toegepaste soort cement. Voor CEM52.5N geldt: $s = 0.20$

Op tijdstip van 10 dagen volgt hieruit:

$$\beta_{cc} = 0.87$$

De ontwerpsterkteklasse van het brugdek bedroeg C50/60. De gemiddelde waarde van de betondruksterkte na 28 dagen bedraagt voor deze klasse: $f_{cm} = 50 + 8 = 58$ N/mm². Op tijdstip 10 dagen geldt dan:

$$f_{cm}(t) = 0.87 * 58 = 50.5 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow f_{ck} = 50.5 - 8 = 42.5 \text{ N/mm}^2, f_{cd} = 42.5 / 1.5 = 28.3 \text{ N/mm}^2$$

De formule is geldig voor een gemiddelde temperatuur van 20°C en de juiste nabehandeling. Daarbij is de daadwerkelijke sterkteontwikkeling afhankelijk van het type cement. De sterkteontwikkeling van het dek is snel gegaan. Uit rijpheidsmetingen is gebleken dat reeds na ca. 13 dagen de 28-daagse sterkte was bereikt. Voor het bepalen van het MNK-diagram op het moment van meting 2 is aangenomen dat een sterkteklasse overeenkomstig een C45/55 reeds was bereikt.

In principe geldt dat met de 28-daagse sterkte de (theoretische) eindsterkte van het beton is bereikt. Gezien de snelle sterkteontwikkeling en de resultaten voor de gedrukte kubussen in het laboratorium van de TU Delft (zie par. 4.2.2) is de verwachting dat de sterkteontwikkeling hoger is geweest. Voor meting 3 (14 dagen na de stort) is bij het bepalen van het M-N-K-diagram uitgegaan van de 28-daagse sterkte.

Bij het bepalen van het M-N-K-diagram is voor meting 4 uitgegaan van een sterkteklasse overeenkomstig C55/67 wat 1 sterkteklasse hoger is dan de toegepaste betonsterkteklasse. Meting 4 is omstreeks dezelfde periode uitgevoerd als de drukproeven op de kubussen in het laboratorium. Het betondek was op dat moment 49 dagen oud. De rekgrenzen ϵ_{c3} en ϵ_{cu3} wijken bij deze sterkteklasse af van de betonsterkteklassen t/m C50/60 en bedragen:

$$\epsilon_{c3} = 1.80\text{‰}$$

$$\epsilon_{cu3} = 3.10\text{‰}$$

Bij het bepalen van het MNK-diagram is voor meting 5 uitgegaan van een nog verdere doorontwikkeling en is uitgegaan van C60/75 wat 2 sterkteklassen hoger is dan de toegepaste betonsterkteklasse. Het betondek was op dat moment 97 dagen oud. De rekgrenzen ϵ_{c3} en ϵ_{cu3} wijken bij deze sterkteklasse af van de betonsterkteklassen t/m C50/60 en bedragen:

$$\epsilon_{c3} = 1.90\text{‰}$$

$$\epsilon_{cu3} = 2.90\text{‰}$$

In bijlage G zijn de invoer en de grafische weergaven van de M-N-K-diagrammen opgenomen. In Tabel 4.12 zijn de resultaten samengevat.

Tabel 4.12 Resume M-N-Kappa

	f_{cd} [N/mm ²]	f_{ctm} [N/mm ²]	M_{ed} [kNm]	N_{ed} [kN]	E [N/mm ²]
Meting 2	30.00	3.80	75	1100	19.269
Meting 3	33.33	4.07	400	5500	21.060
Meting 4	36.67	4.21	1433	5500	22.389
Meting 5	40.00	4.35	1053	5500	23.072

Bij het opstellen van de M-N-K-diagrammen is gebleken dat vloeien van de wapening eerder optreedt dan stuik van het beton. Het opneembare moment is dus relatief hoog ten opzichte van de normaaldrukbelasting. Dit komt door de grote hoogte van de doorsnede in combinatie met de relatief hoge betonsterkteklasse.

De theoretische spanningen zijn bepaald op basis van een rekenmodel met een E-modulus welke de ongescheurde eigenschappen benadert. Te zien is dat de ontwikkeling van de E-modulus nog gestaag is doorgegaan. Op alle meetmomenten bevond de constructie zich in de ongescheurde tak van het M-N-K-diagram. De golfsnelheid van het ultrasone signaal is onder andere afhankelijk van de E-modulus (Planès & Larose, 2013). Bij een toename van de E-modulus neemt de golfsnelheid ook toe. In par. 4.2.1 wordt dit beeld bevestigd aan de hand van de tests met de cilinders. De (door)ontwikkeling van de sterkte van het beton zal een grote

invloed gehad hebben op de resultaten van de metingen. Het verklaart bovendien waarom een te verwachten negatieve dv/v (afname $\Delta\sigma$) minder goed zichtbaar is geweest. De relatief grote negatieve $\Delta\sigma$ aan de onderzijde in meting 4- $\rightarrow$ 3 geeft weliswaar een te verwachten negatieve dv/v , maar de waarden hiervan zijn relatief klein. Een toename van de dv/v ten gevolge van de sterkteontwikkeling van het beton heeft hier wellicht de overhand in gehad.

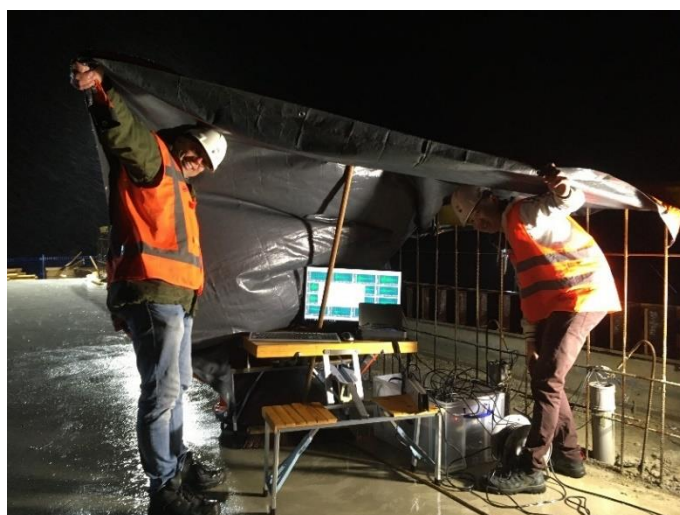
Aan de bovenzijde was in meting 5- $\rightarrow$ 4 een kleine negatieve $\Delta\sigma$ te verwachten. De resultaten van de dv/v laten hier een kleine positieve waarde zien. Ook in deze fase is aan de hand van de M-N-K-diagrammen te zien dat de E-modulus nog is toegenomen wat van invloed is geweest op de meetresultaten. Daarbij wordt hier opgemerkt dat dit theoretische verschilspanningen zijn met een waarde welke niet expliciet groot zijn en in de praktijk zullen afwijken. Het is niet ondenkbaar dat in het betreffende lokale gebied de spanningen net anders zijn geweest.

4.6.5 Weersinvloeden

Het uitvoeren van CWI is gevoelig voor diverse factoren waaronder weersinvloeden; temperatuur, vochtigheid. De metingen zijn op verschillende momenten uitgevoerd onder wisselende condities. In Tabel 4.13 zijn de omstandigheden van de metingen weergegeven.

Tabel 4.13 Omstandigheden metingen

Meting	Omschrijving	dd.	Temp (ca.)	
1	Direct na stort	15-9-2020	18	Droog Avond / nacht
2	Na aanbrengen 20% voorspanning	21-09-2020	25	Volle zon
3	Na aanbrengen 100% voorspanning	25-09-2020	10	Regen, avond
4	Ontkisten bouwphase 1	30-10-2020	13	Bewolkt
5	Ontkisten aansluitende bouwphase 2	17-12-2020	12	Bewolkt



Figuur 4.19 Niet-ideale omstandigheden meting 3

De temperatuur en weersomstandigheden zijn behoorlijk wisselend geweest, ook tussen twee direct opvolgende meetmomenten. In het artikel van (Planès & Larose, 2013) wordt temperatuur aangemerkt als grote “vervuiler” van de CWI. Een lagere temperatuur geeft over het algemeen een hogere golfsnelheid. Dat de weersomstandigheden invloed hebben gehad op de metingen is niet ondenkbaar.

4.6.6 Microscheurvorming

Het ontstaan van microscheurvorming heeft effect op de snelheid van de golf, maar door damping ook op de vorm van de golf. Beide effecten hebben daarmee direct invloed op de (kwaliteit) van de uit te voeren CWI. Een effect dat hier ook betrekking op heeft, betreft het Kaisereffect wat de invloed van de historie van de aanwezige spanningen in een constructie beschrijft. Bij het overstijgen van een historisch spanningsniveau ontstaat extra scheurvorming (Planès & Larose, 2013). Dit geeft dus mogelijk bij gelijke belastingen een ander resultaat voor de golfsnelheid. Dit is ook te zien bij de cilinder-drukproeven waarbij een verschillend resultaat werd gevonden bij een identieke belastingtoename. Tussen de meetmomenten op de brug kan een extra (bouw)belasting hierdoor gezorgd hebben voor een andere “vingerafdruk”, dus een andere referentie.

5 DISCUSSIE

Het doel van dit onderzoek was om bestaand laboratoriumonderzoek op te schalen naar een praktijksituatie en daarbij een theoretisch rekenmodel te valideren aan de resultaten van praktijkonderzoek. Tijdens het onderzoek en het uitwerken van de resultaten zijn diverse aandachtspunten naar voren gekomen welke hier kort worden benoemd.

Tijdens het uitwerken de resultaten van de metingen, is gebleken dat het verwerken en het analyseren van de data complex is. De output is niet direct meetbaar en kwantificeerbaar. Het verkrijgen van een bruikbare output hangt af van het invoeren van diverse variabelen welke moeten worden onderzocht (tijdvenster, frequentie). Afhankelijk van deze variabelen, welke ook nog per signaal kunnen verschillen, zijn de resultaten verschillend. Een vaste aanname voor alle data verwerking is hierin het meest praktisch, maar dit geeft mogelijk niet voor alle data het meest zuivere resultaat.

Naast het spanningsniveau in de constructie hebben diverse andere effecten invloed op de golfsnelheid. Het hydratatieproces van het beton, het ontstaan van (micro-) scheurvorming, de temperatuur en het Kaiser-effect hebben allen invloed op de grootte van de golfsnelheid van het signaal. De noodzakelijkheid van een stabiel referentiesignaal op basis waarvan de spanningsontwikkeling in de constructie kan worden gemonitord, wordt door deze factoren over de langere termijn wellicht verstoord. Juist in de tijdspanne van de metingen is de constructie aan veel wijzigingen onderhevig geweest, niet alleen qua krachtsverdeling, maar ook met betrekking tot het verhardingsproces. Om een verschilspanning in de constructie vast te stellen, moet een referentie (basis-) signaal worden gemeten kort voordat de meting wordt uitgevoerd. In het onderzoek van (Planès & Larose, 2013) wordt gesteld dat om een accurate CWI te bewerkstelligen een korte tijdspanne (minuten, uren) tussen de metingen noodzakelijk is. In dit onderzoek is de tijd tussen de metingen vele malen groter geweest. Om dergelijke effecten te kwantificeren en te verdisconteren in de resultaten is complex. Uitgevoerd laboratoriumonderzoek is gezien de schaalfactor en condities niet representatief om kwantitatief te gebruiken. Een kwantitatieve overeenkomst van de metingen met de theoretische spanningen is hierdoor uitermate lastig.

De krachtsverdeling tijdens de spanfase is onderzocht, inclusief de invloed van de ondersteuningsconstructie tijdens het spannen. Het rekenmodel voor de invloed van de veerstijfheid van de ondersteuning is afhankelijk van diverse variabelen. De veerwaarde van de ondersteuningsconstructie is bijvoorbeeld gelijkmatig over de lengte en breedte van het dek verondersteld. Dergelijke aannames hebben invloed op het werkelijke spanningsniveau.

De theoretische spanningen in de bouwfases zijn bepaald met een liggermodel waarvoor de berekende krachtsverdeling gelijkmatig is aangenomen over de breedte van de dekconstructie. De posities van de sensoren bestrijken een heel lokaal gedeelte van de brug. Of de berekende krachtsverdeling precies ter plaatse van de sensoren nauwkeurig genoeg is om tot een nauwkeurige kwantitatieve validatie te komen is maar de vraag.

6 BEANTWOORDING VAN DE ONDERZOEKSVRAGEN

Om de hoofdvraag van dit onderzoek te beantwoorden, zijn de volgende deelvragen onderzocht:

a. Wat is Coda Wave Interferometry?

Coda Wave Interferometry (CWI) is een techniek waarbij metingen van ultrasone geluidsgolven (door een constructie) met elkaar worden vergeleken. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het akoestoelastisch effect wat omvat dat de snelheid van een geluidsgolf door een constructie mede afhankelijk is van het spanningsniveau in deze constructie. Bij het uitvoeren van CWI wordt het verschil in golfsnelheid tussen twee signalen bepaald, welke op 2 verschillende tijdstippen door de constructie zijn gegaan. Een gemeten signaal wordt daarbij dusdanig opgerekt dat dit zo goed als mogelijk op een referentiesignaal past. De benodigde mate van oprekken kan worden gecorreleerd aan het spanningsverschil dat in de constructie tussen de twee tijdstippen van de metingen is opgetreden.

b. Wat is er nodig voor het opschalen van het laboratoriumonderzoek naar praktijkonderzoek?

Bij het opschalen van het laboratoriumonderzoek moet worden gelet op inpasbaarheid van de meetlocaties in de constructie ter plaatse van de te valideren krachtsverdeling met in achtneming van mogelijke verstoringen door aanwezige wapening en in te storten onderdelen. De meetlocaties moeten daarbij robuust uitgevoerd kunnen worden om schades tijdens uitvoering te voorkomen. Om in de toekomst gebruik te kunnen blijven maken van de sensoren is gekeken naar een blijvende bereikbaarheid van de connectoren. Het meetsysteem is specifiek ontworpen en samengesteld voor dit praktijkonderzoek zodat meer dan twee sensoren tegelijk konden worden aangesloten en waarbij de meetdata automatisch gestructureerd wordt weggeschreven. Het meetsysteem kan wellicht verder worden geoptimaliseerd zodat het niet meer nodig is om de sturende actieve sensor te wisselen.

c. Welke krachtsverdeling willen we valideren?

Het voorgespannen brugdek is in meerdere bouwfases gerealiseerd waarbij de voorspanning en wapening in de stornaden is doorgekoppeld. Hiermee is een doorgaand brugdek zonder voegen gerealiseerd. Door deze bouwwijze zijn directe effecten en tijdsafhankelijke Kist-effecten te verwachten voor de krachtsverdeling. Deze effecten willen we valideren.

d. Welke posities voor het aanbrengen van de sensoren zijn het meest geschikt waarbij relevante en interessante data kan worden verkregen?

De meetlocaties voor dit onderzoek zijn bepaald aan de hand van de te verwachten directe verschuivingen van de krachtsverdeling ten gevolge van het wijzigen van het statisch systeem tijdens de bouw van de brug en de tijdsafhankelijke verschuivingen. De meetlocaties zijn zo gekozen dat de verschuivingen naar verwachting dusdanig groot zijn, dat deze zichtbaar gemaakt kunnen worden met de CWI.

e. Zijn de resultaten vanuit de Coda Wave Interferometry na analyse betrouwbaar?

De metingen van de in het onderzoek geanalyseerde meetlocatie POS3 bleken wisselend van kwaliteit. Intensieve nabewerking heeft plaats moeten vinden om tot een enigszins betrouwbaar resultaat te komen. Gezien de hoeveelheid data is het toepassen van een geautomatiseerd script hierbij noodzakelijk geweest. Desondanks worden er gezien de lage waarden van de Correlatie Coëfficiënt significant minder betrouwbare resultaten behaald ten opzichte van uitgevoerd laboratoriumonderzoek. De relatief lange periodes tussen de metingen hebben hierbij een rol gespeeld omdat er in deze periodes veel veranderingen plaats hebben gevonden in de constructie. De metingen zoals uitgevoerd zijn in het beginstadium uitgevoerd. Naast de wijzigingen van het statisch systeem, ontstaat er nog veel hydratatie in het beton. Het hydratatieproces heeft een grote invloed op de golfsnelheid van het signaal. Hierdoor komen de golven van het referentie- en het meetsignaal matig met elkaar overeen wat ten koste gaat van de betrouwbaarheid van de CWI. De betrouwbaarheid, de CC-waarde, liep gedurende de metingen wel op.

f. Is Coda Wave Interferometry een geschikte methode om de krachtsverdeling te valideren?

Uit divers historisch laboratoriumonderzoek is gebleken dat CWI een geschikte methode is om spanningen in een constructie te meten. Bij een juiste dataverwerking en voldoende kwaliteit van de signalen is een overeenkomst te vinden met het bekende spanningsniveau in de constructie. De metingen zijn echter gevoelig voor diverse effecten. Tussentijdse wijzigingen in de constructie zoals het hydratatieproces, maar ook (micro)scheurvorming, maken dat de referentie waarmee wordt vergeleken wijzigt. Dit is ook geïllustreerd met de drukproef op de cilinders waarbij de tweede cyclus van gelijke belastingen een ander resultaat gaf. Dat maakt dat het op dit moment nog lastig is om een accurate validatie uit te voeren van de theoretische wijzigingen in de krachtsverdeling in een werkelijke praktijksituatie.

g. Is er een kwantitatieve relatie te vinden tussen de resultaten van de Coda Wave Interferometry en de theoretische spanningsniveaus in de betreffende fases?

Aan de hand van de resultaten van meetlocatie POS3 is na een diepere beschouwing van de resultaten een verklaarbare correlatie af te leiden met de theoretische wijzigingen van de krachtsverdeling. Om de invloed van het hydratatieproces nauwkeurig mee te kunnen nemen en te verdisconteren met de resultaten is het van belang om hier reële metingen van te hebben met gelijkwaardige, representatieve uitgangspunten. Kwantitatieve overeenkomsten van de golfsnelheid met de hydratatie van de cylindertest en de praktijkproef zijn gezien de schaalgrootte en conditionering niet te leggen. Een kwantitatieve relatie tussen de resultaten van de CWI en de theoretische spanningsniveaus is hierdoor niet gevonden.

h. Is het meetsysteem robuust genoeg om gedurende de bouwfase en gebruiksfase voor langere tijd te gebruiken?

Het meetsysteem is tijdens de bouw intact gebleven. Alle sensoren geven een meetresultaat. Door de bekabeling in een trekput achter de vangrail onder te brengen, zijn de sensoren ook voor toekomstig gebruik bereikbaar. Na afronding van de metingen voor dit onderzoek zijn er reeds enkele metingen uitgevoerd voor aanvullend onderzoek.

7 BEANTWOORDING HOOFDVRAAG, CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In dit onderzoek is gezocht naar beantwoording van de hoofdvraag:

- *Is het in een praktijksituatie mogelijk om middels het uitvoeren van Coda Wave Interferometry de krachtsverdeling en wijzigingen hierin in een betonconstructie te valideren?*

Vastgesteld is dat uit dit onderzoek is gebleken dat een globaal, kwalitatief beeld van de wijzigingen van de krachtsverdeling in een praktijksituatie met CWI zichtbaar is te maken. Het meetsysteem is functioneel in de praktijk en toegankelijk voor toekomstig onderzoek. Voor het uitvoeren van CWI is het echter van belang dat het referentiesignaal waarmee de CWI wordt uitgevoerd, betrouwbaar en stabiel, representatief is. Door verscheidene factoren ten tijde van dit onderzoek, is dit niet het geval geweest. De ontwikkeling van de golfsnelheid door andere factoren dan het spanningsniveau in de constructie, hebben het voor dit praktijkonderzoek niet mogelijk gemaakt om een kwantitatieve validatie van de theoretische krachtsverdeling uit te voeren. Ook bij toekomstig onderzoek zal een kwantitatieve validatie van de krachtsverdeling complex zijn. Juist in een praktijksituatie zijn veel externe, niet geconditioneerde, invloeden aanwezig welke lastig te monitoren en te compenseren zijn.

Concrete conclusies welke getrokken zijn naar aanleiding van dit onderzoek betreffen:

- Het uitvoeren van CWI in een praktijksituatie is uitvoeringstechnisch mogelijk. Verwerking van de sensoren en bekabeling in de constructie is met enige voorbereiding goed uitvoerbaar. Het systeem is robuust genoeg om voor langere tijd te gebruiken.
- Om resultaten van metingen bruikbaar te maken voor CWI, dient intensieve nabewerking plaats te vinden van de meetdata.
- Hydratatie van het beton heeft in de eerste periode een grote invloed op de ontwikkeling van de golfsnelheid en daarmee op de CWI.
- CWI is sterk afhankelijk van een stabiel referentiekader. Validatie van wijzigingen in de krachtsverdeling ten gevolge van het wijzigen van het statisch systeem en langetermijn effecten is complex. CWI dient uitgevoerd te worden op metingen welke kort na elkaar zijn uitgevoerd om invloed van hydratatie, Kaisereffect, microscheurvorming en temperatuur te voorkomen. Tussentijdse effecten op de metingen zijn moeilijk te kwantificeren en daardoor lastig te compenseren met de resultaten.

Bij uitvoering van toekomstig onderzoek verdient het daarom de aanbeveling het volgende in acht te nemen:

Bij toepassing in een betonconstructie in de eerste levensfase is een juiste bepaling van de invloed van het hydratatieproces op de golfsnelheid van belang. Bij toepassing in nieuwe constructies is het daarom wenselijk om sensoren op een spanningsloze locatie in de constructie mee te storten, waarbij de effecten van het hydratatieproces onder dezelfde

omstandigheden als de constructie zelf kunnen worden gemonitord. Hiermee kan een zuiverder beeld worden verkregen van de ontwikkeling van de golfsnelheid ten gevolge van het hydratatieproces welke vervolgens kan worden gecompenseerd met de resultaten van een belast gebied.

Het sensorsysteem in KW09 is nog steeds toegankelijk en bruikbaar. Toekomstige metingen kunnen zich bijvoorbeeld richten op metingen met en zonder verkeer. Een toepassing waarbij aan de hand van de signalen een “vingerafdruk” kan worden gemaakt, kan mogelijk een beeld geven van de daadwerkelijke spanningen bij een bepaalde intensiteit van het verkeer. Met het oog op de in de discussie aangehaalde factoren zoals het Kaiser-effect en temperatuurschommelingen, is het van belang dat de invloed hiervan op deze vingerafdruk wordt erkend. Tijdens een monitoring over een langere termijn zal de vingerafdruk steeds moeten worden bijgesteld.

In het algemeen verdient het de voorkeur om de tijdsspanne tussen de referentiemeting en de vergelijkingsmeting zo kort als mogelijk te houden waarbij men bedacht moet zijn welke factoren in de tijdsperiode tussen de metingen van invloed kunnen zijn op het uitvoeren van een accurate CWI.

8 ZELFREFLECTIE

Het doorlopen van mijn afstudeertraject heeft lang geduurd. Langer dan ik had gepland. De praktische kant van het onderzoek is voorspoedig gelopen. De samenwerking met de diverse mensen vanuit de TU Delft was heel leerzaam waarbij ik veel ondersteuning heb gekregen, met name voor het verwerken van de data.

De eerste periode van het onderzoek heeft bestaan uit het vaststellen van de beoogde meetlocaties waarna de benodigde materialen konden worden besteld. Naast deze opstart ben ik begonnen met het verzamelen van de eerste literatuur omtrent dit onderwerp en het uitwerken van de montageschetsen van de meetlocaties. Vervolgens was het wachten op de materialen. In deze periode is een start gemaakt met de literatuurstudie. Een heel interessant proces om deze niet alledaagse en onbekende materie te doorgronden.

Het uitvoeren van de metingen ging heel voorspoedig, samen met een afstudeerder van de TU. Een meetsessie kostte een groot deel van een dag (of nacht). Bijzonder leuk om te doen, maar het werd me wel duidelijk dat er een heleboel data werd verzameld, wat me in die zin ook wel weer zorgen baarde hoe dit te verwerken en analyseren. In de periode na de metingen is divers overleg geweest om de MatLab-codes werkbaar te maken voor de data van de brug en deze verder te optimaliseren. Deze periode is qua concrete voortgang niet heel productief geweest. Het steigerwerk van het rapport is opgezet, maar deze periode had ik intensiever kunnen gebruiken om het steigerwerk ook deels te vullen, bijvoorbeeld met het verwerken van de voorbereidingen van het onderzoek. Het literatuuronderzoek heb ik in deze periode wel verder opgepakt. Ik verdiepte me steeds verder in de werking van het systeem waarbij ik mezelf er meermaals van moest weerhouden om niet te veel te verzanden in aanverwante deelonderwerpen welke weliswaar heel interessant konden zijn, maar welke niet direct van heel groot belang waren voor mijn onderzoek.

Om uit de enorme hoeveelheid data de data te krijgen wat ik wilde, was een lastige periode. Ondanks de goede hulp vanuit de TU met betrekking tot de algoritmes, kon ik moeilijk de juiste resultaten filteren. Wat lees je nu af, wat is de waarde hiervan. Daarbij wilde ik graag een fit zien te krijgen met “mijn” berekeningen van de brug. Nadat de eerste resultaten dan toch op papier waren gezet waarbij al voorzichtig werd geconcludeerd dat een kwantitatieve correlatie helaas niet zou gaan lukken, is het schrijven en verwerken tot een stilstand gekomen. Druk op het werk, druk met het gezin, genoeg redenen om het elke week een weekje uit te stellen. Dit is heel zonde gebleken, want toen ik na een aantal maanden de draad weer wilde oppakken, bleek het veel tijd te kosten om weer in de flow te komen. Waar was ik, wat waren mijn eerste conclusies, hoe werkte de MatLab-codes ook al weer, wat had ik ook al weer gelezen in de literatuur, etc. Afronding heeft om deze reden lang geduurd. Wel ben ik na deze heropstart bezig gebleven met het verwerken en schrijven om te voorkomen om weer stil te vallen en opnieuw op te moeten starten. De ene week wat meer dan de andere, maar genoeg om beetje bij beetje het voorliggende rapport met een goed gevoel tot een afronding te hebben gebracht.

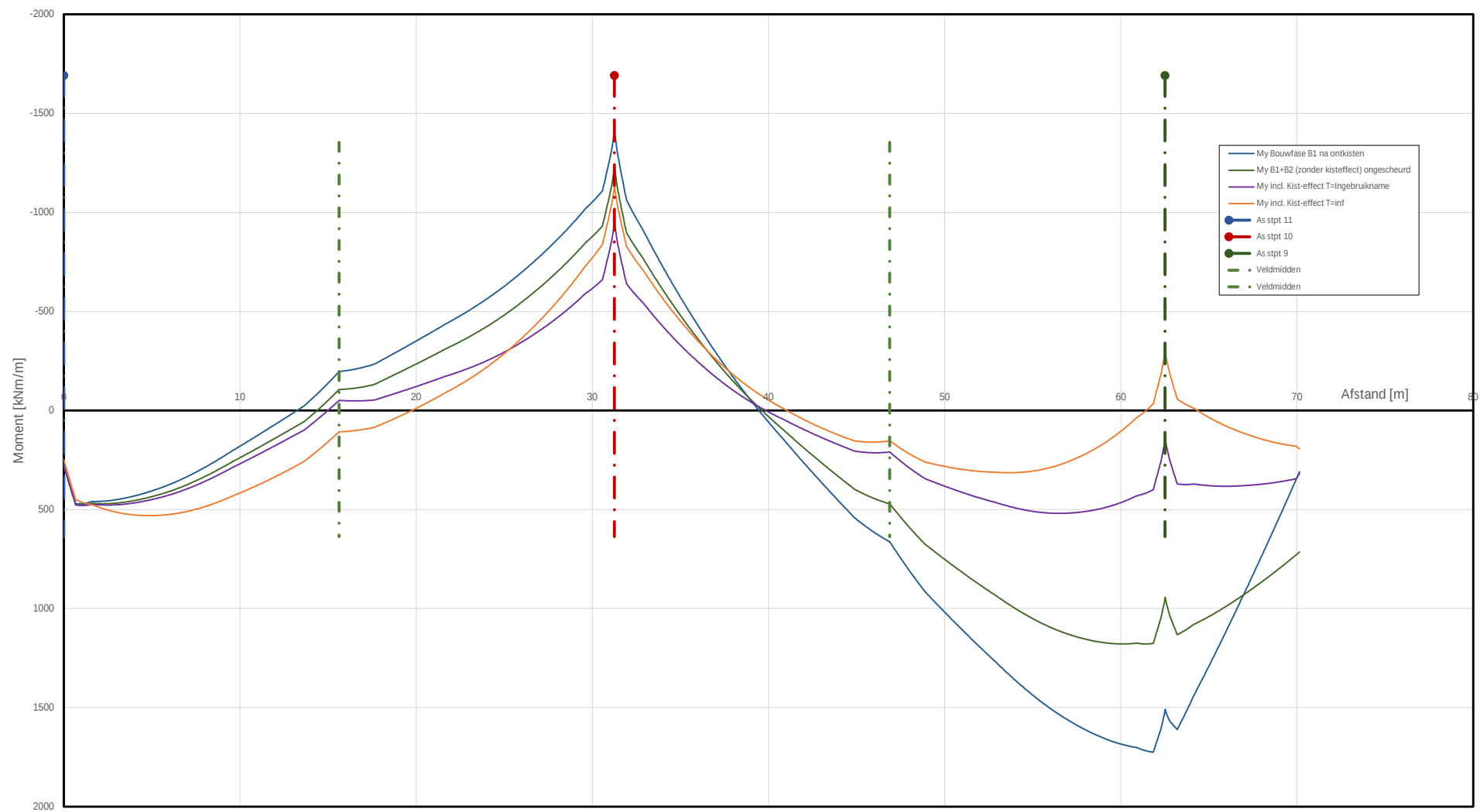
9 BIBLIOGRAFIE

- Boskalis Nederland. (2019). *Ontwerprapport DO Beekdalbruggen - KW2 en KW9*.
- Boskalis Nederland. (2019). *Ontwerptekeningen Nieuwe Verbinding N69 - KW09 Definitief Ontwerp serie*.
- Boskalis Nederland. (2020). *Ontwerptekeningen Nieuwe Verbinding N69 - KW09 Uitvoeringsontwerp serie*.
- Boskalis Nederland, NEXT, H+N+S, Mos Ecologisch Advies. (2019). *N69 Integraal Kader Ruimtelijke Kwaliteit*. Valkenswaard.
- Bouma, A. L. (2000). *Mechanica van Constructies*. Delft: VSSD.
- Braam, C., & Lagendijk, P. (2011). *Constructie leer gewapend beton*. Boxtel: Aenas.
- Chan, T. H., Yu, Y., Wong, K., & Guo, L. (2007). *A Multi-scale Finite Element Model of Tsing Ma Bridge for Hot Spot Stress Analysis*. Opgeroepen op 5 24, 2021, van <https://eprints.qut.edu.au/12659>
- Du, C., Yang, Y., & Hordijk, D. (2019). Experimental investigation on crack detection using imbedded smart aggregate. In *Life-Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering* (pp. 1199-1206). CRC Press / Balkema - Taylor & Francis Group.
- Fu, D. (2022). *Application of Coda Wave Interferometry with embedded Smart Aggregate in a presressed cast-in-situ concrete continues slab bridge*. Delft: TU Delft.
- Galjaard, H. (2016). *Voorgespannen Beton*. Gouda: Betonvereniging.
- Kevinly, C. (2018). *Application of Coda Wave Interferometry on concrete structures bij utilizing smart aggregates*. Delft.
- Kevinly, C., Zhang, F., Yang, Y., Draganov, D., & Weemstra, C. (2021). A Study on Monitoring Multi-scale Concrete Members with Coda-wave Interferometry Using Embedded Transducers. In H. Yokota, & D. Frangopol, *Bridge Maintenance, Sfatey, Management, Life-Cycle Sustainability abd Innovations* (p. 6). London: Taylor & Francis Group.
- Milone, G. (2019). *Numerical Study f Stress Identification in Concrete using Coda Wave Interferometry*. Turijn.
- Moore, M., Phares, B., & Washer, G. A. (2004, Juli). *Guidelines for Ultrasonic Inspection of Hanger Pins*. Opgehaald van [www.fhwa.dot.gov: https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/04042/02.cfm](https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/04042/02.cfm)
- Murnaghan, F. (1937, April). Finite Deformations of an Elastic Solid. *American Journal of Mathematics*, 235-260. Opgehaald van https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustoelastic_effect
- Niederleithinger, E., Wang, X., Herbrand, M., & Müller, M. (2018, 06 19). *Processing ultrasonic data by Coda Wave Interferometry to monitor load tests of concrete beams*. Opgehaald van NCBI: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6022108/>
- Planès, T., & Larose, E. (2013). A review of ultrasonic Coda Wave Interferometry in concrete. *Cement and Concrete research*, 248-255.
- Smith, S. W. (1999). *The Scientist and Engineer's guide to Digital Signal Processing*. San Diego: California Technical Publishing.

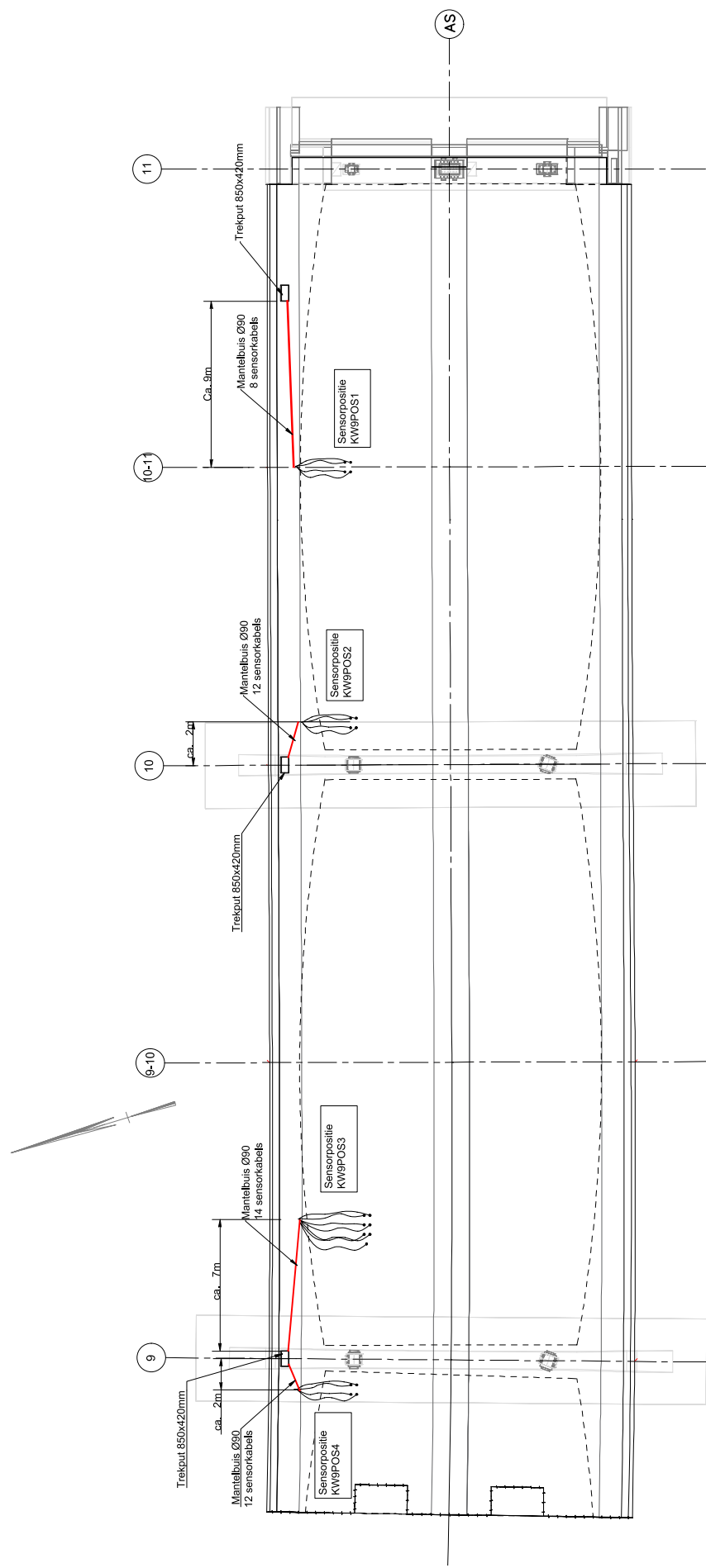
BIJLAGEN

Bijlage:	A. Grafiek output kistanalyse
Bijlage:	B. Montagetekeningen sensoren
Bijlage:	C. Logboeken metingen
Bijlage:	D. Matlab Codes
Bijlage:	E. FFT-Analyse
Bijlage:	F. Spanningsfiguren en spanningstoestand
Bijlage:	G. M-N-K - diagrammen
Bijlage:	H. CWI resultaten meetlocatie POS3

BIJLAGE A – GRAFIEK OUTPUT KIST-ANALYSE



BIJLAGE B – MONTAGETEKENINGEN SENSOREN



KW9 - POSITIONERING SENSOREN

10-11



Meetstok POS1.1

SA Boven nr.90 ->CH0
SA Onder nr.99 ->CH1

Meetstok POS1.2

SA Boven nr.93 ->CH4
SA Onder nr.76 ->CH5

Meetstok POS1.3

SA Boven nr.109 ->CH2
SA Onder nr.111 ->CH3

Meetstok POS1.4

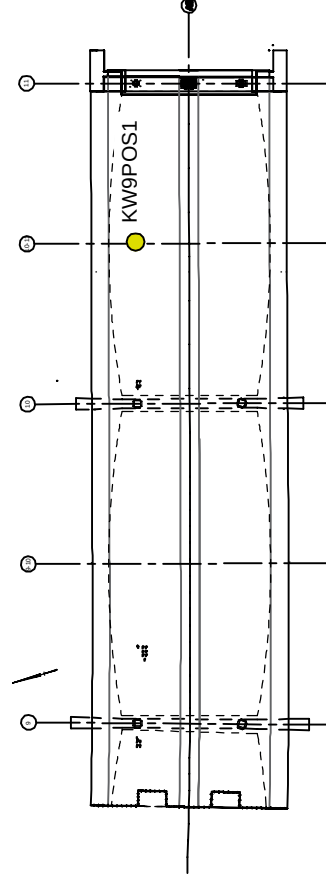
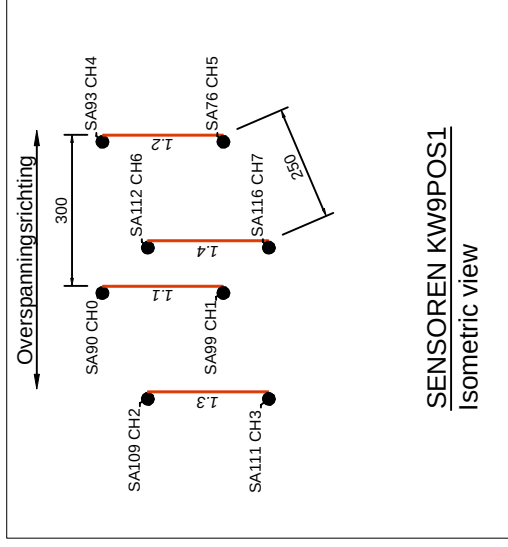
SA Boven nr.112 ->CH6
SA Onder nr.116 ->CH7

SENSOREN KW9POS2

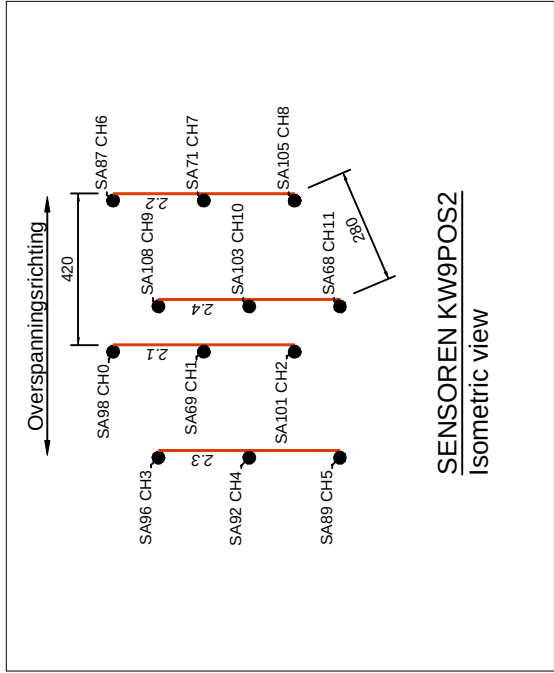
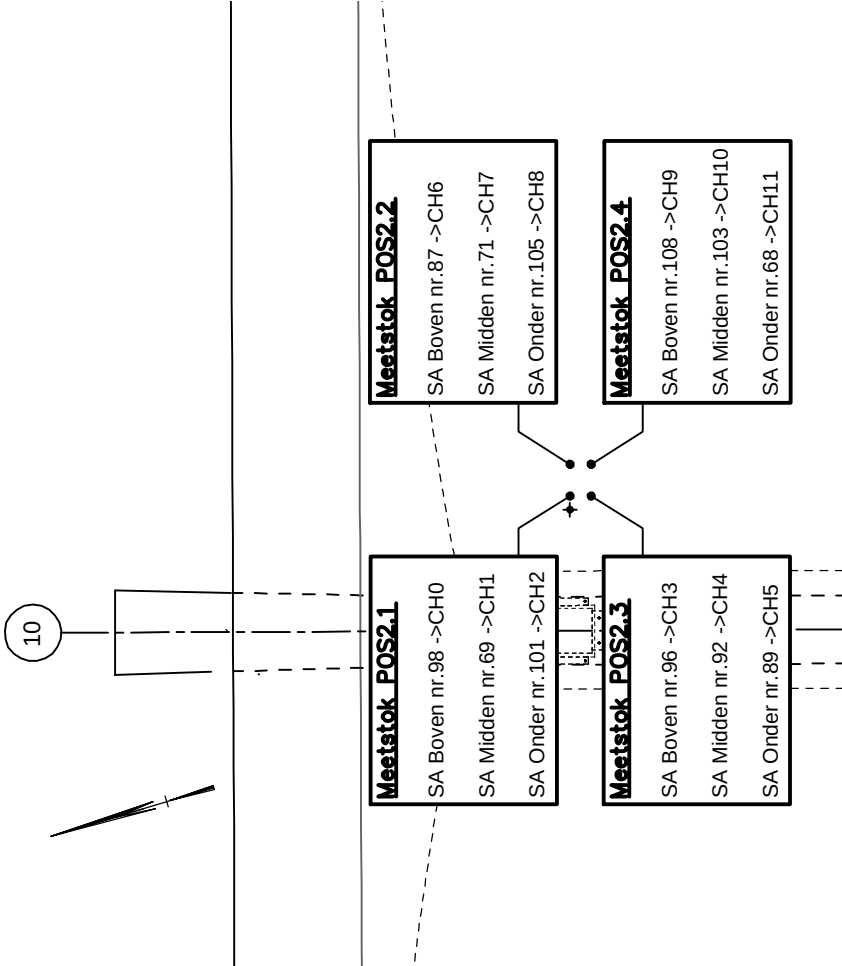
KW9 - SENSOREN POSITIE 1

SA-ID incl. CH-nr. MUX

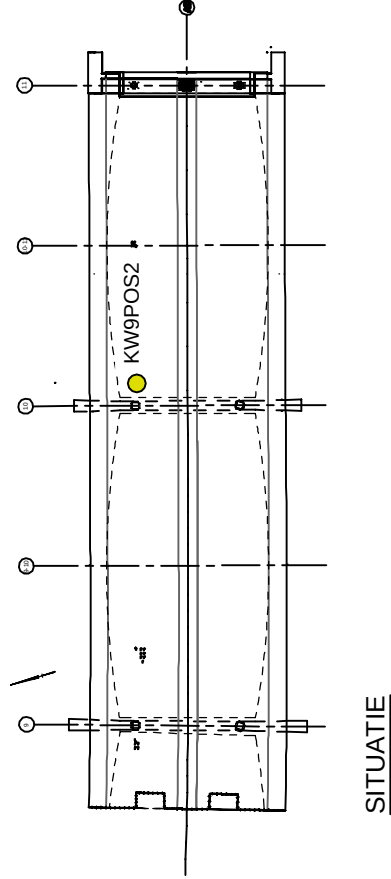
v1.0 - sept. 2020

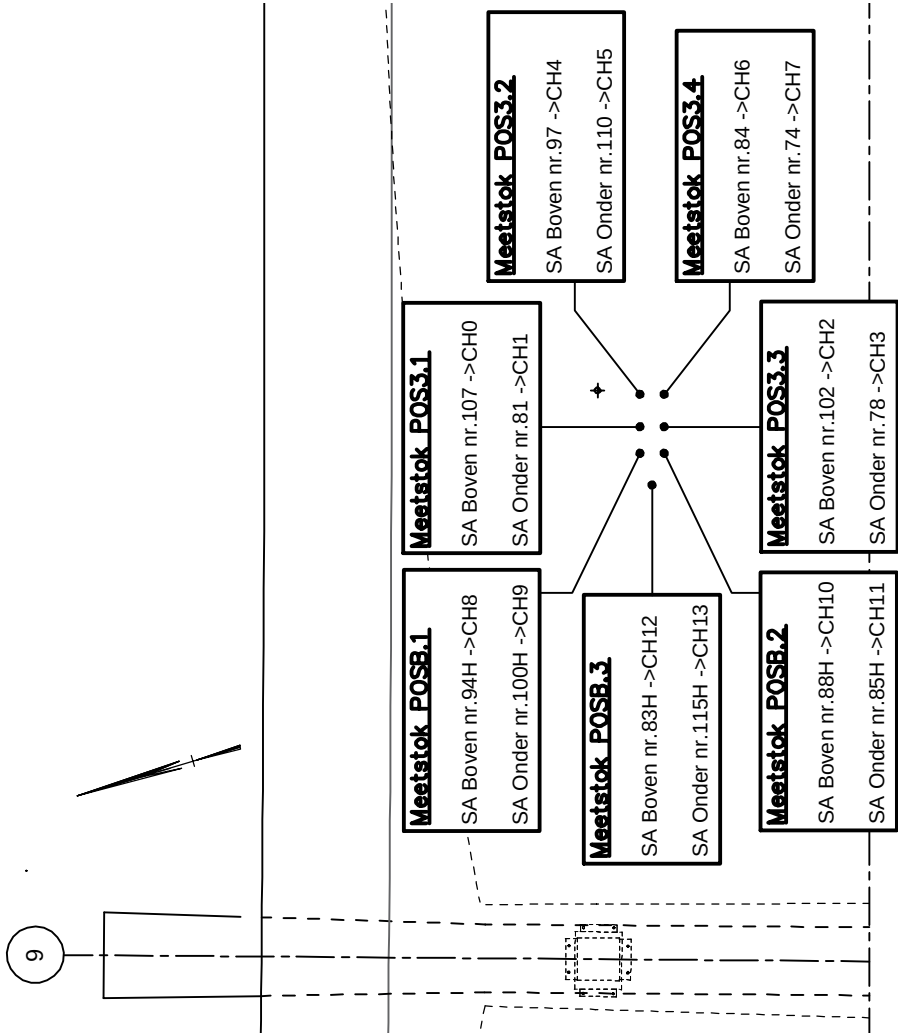


SITUATIE

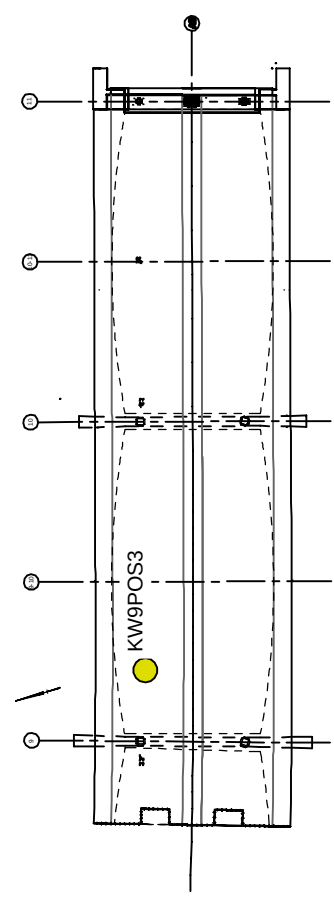
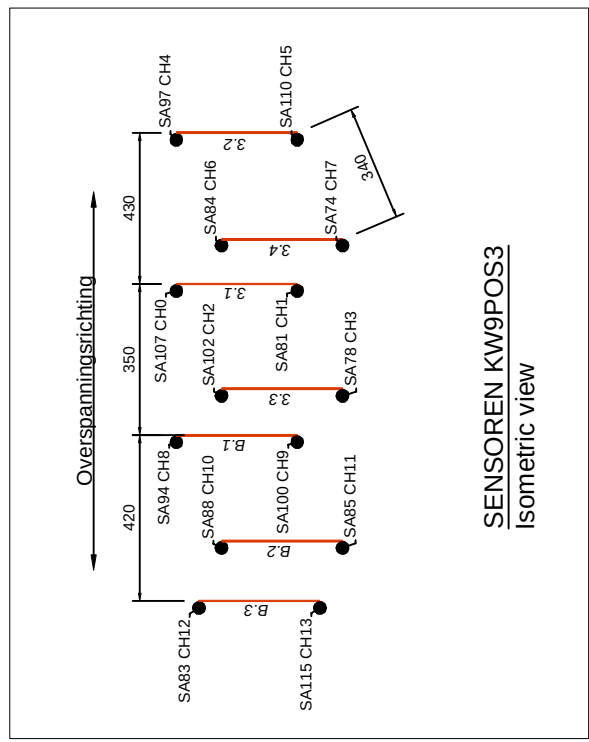


SENSOREN KW9POS2

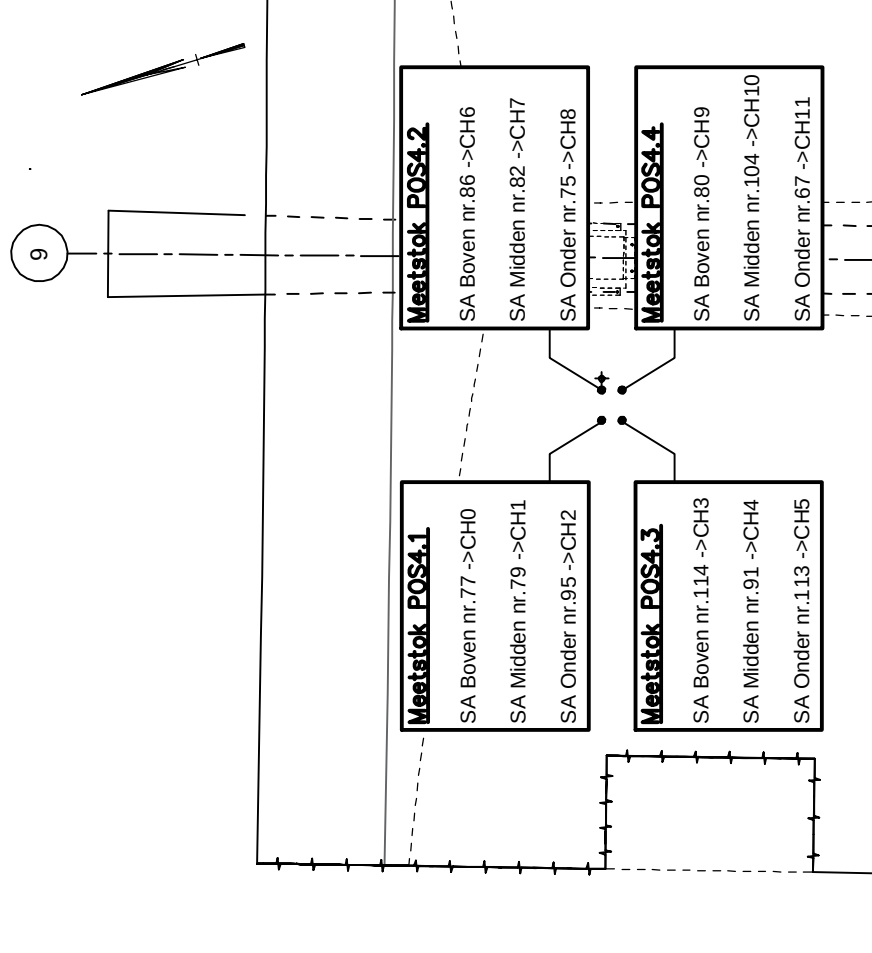




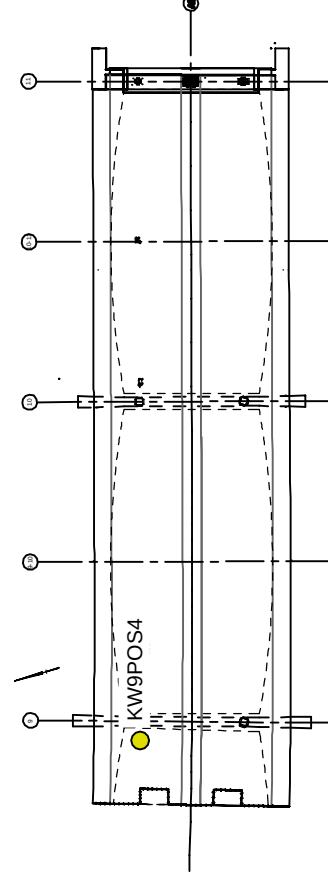
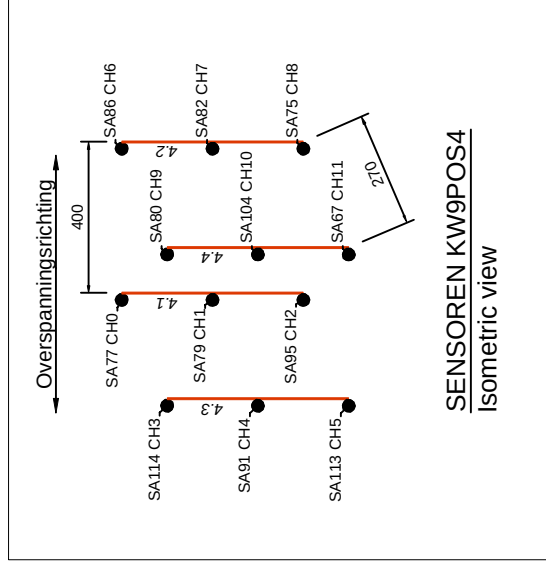
SENSOREN KW9POS3



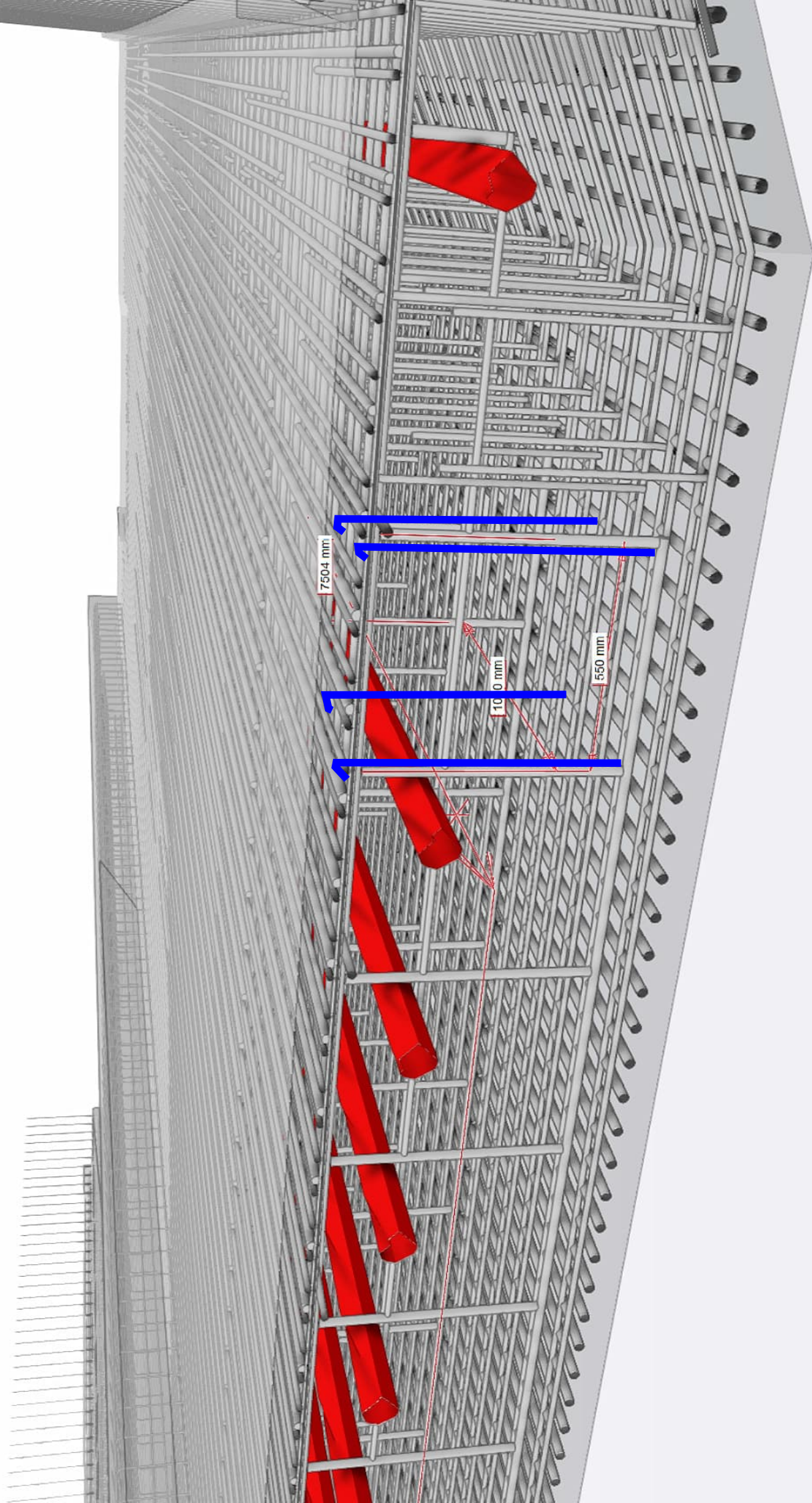
SITUATIE

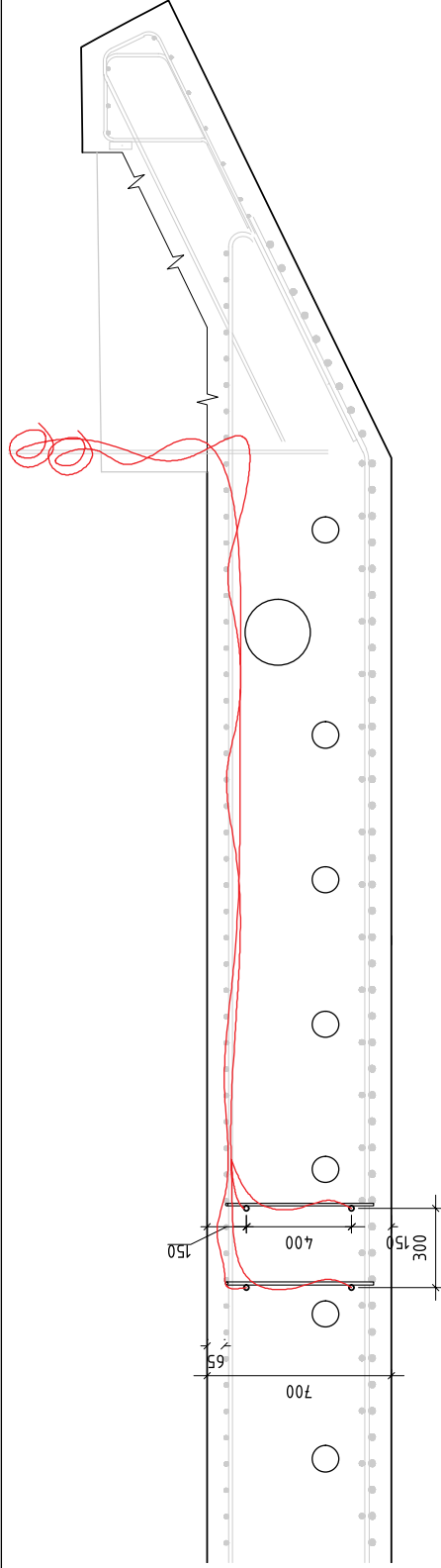


SENSOREN KW9POS4

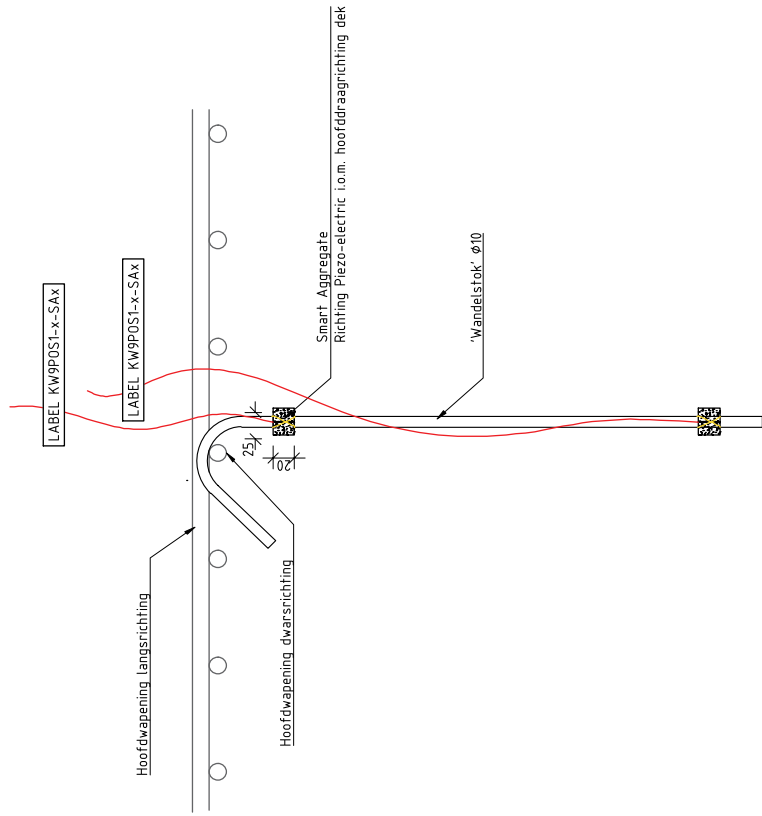


SITUATIE

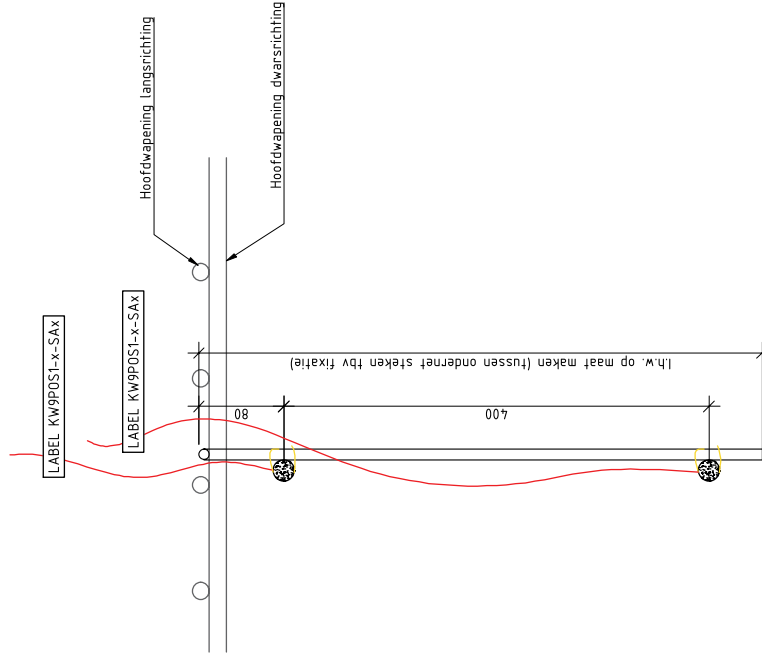




DWARSDOORSNEDE DEK



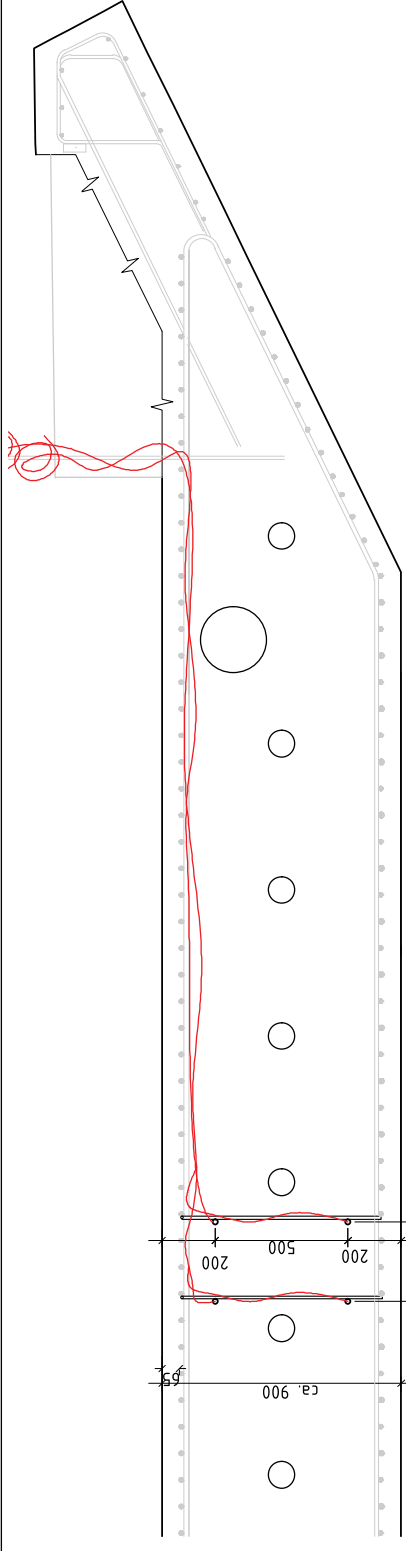
AANZICHT LANGSRICHTING DEK



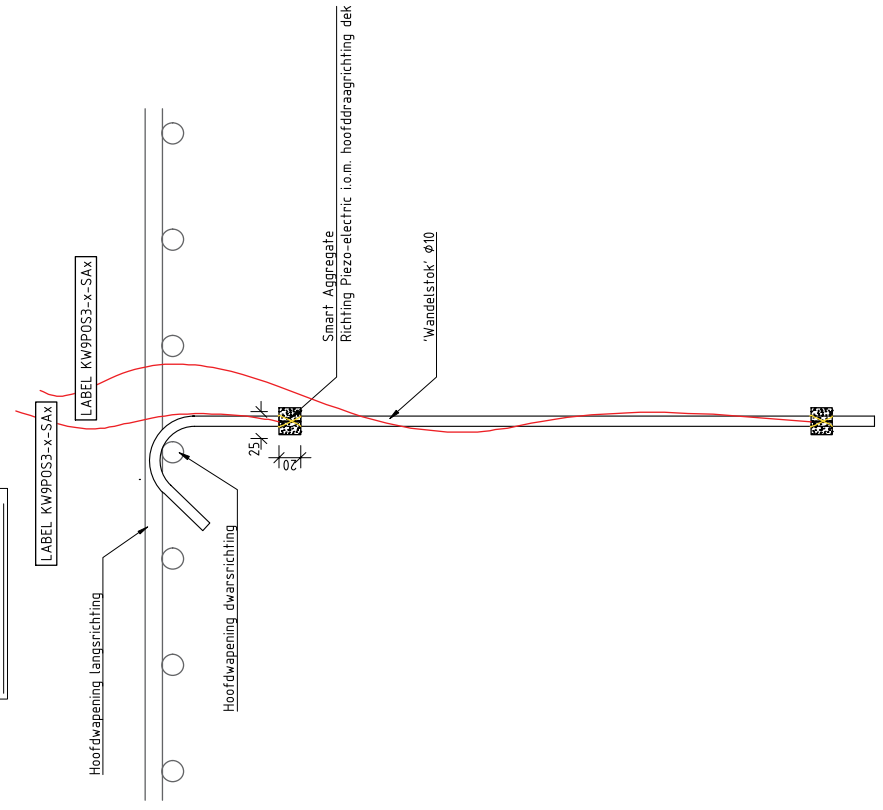
AANZICHT DWARSRICHTING DEK

SENSOREN KW9 POSITIE 1

4x UITVOEREN



DWARSDOORSNEDE DEK



LABEL KW9POS3-x-SAX

LABEL KW9POS3-x-SAX

LABEL KW9POS3-x-SAX

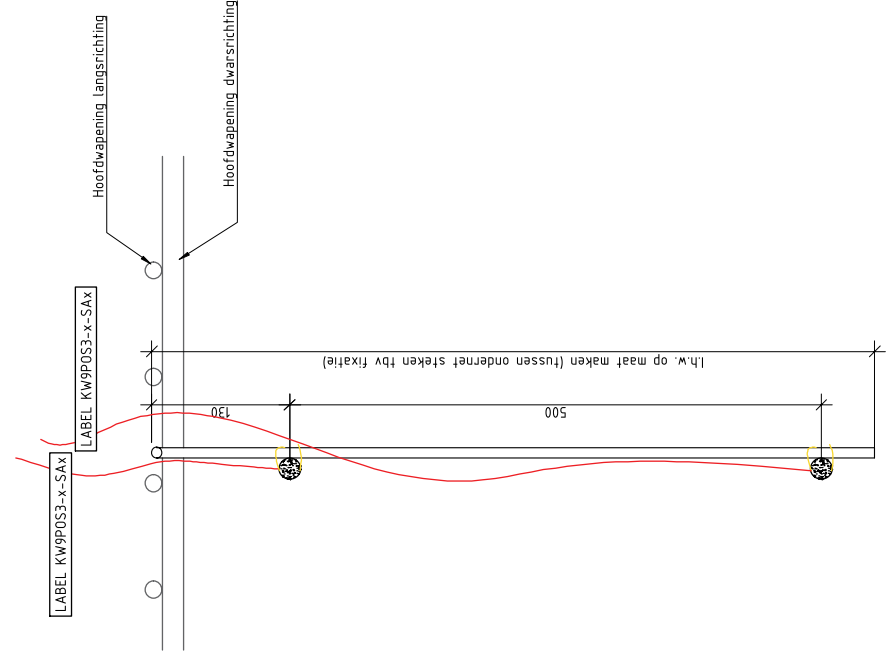
LABEL KW9POS3-x-SAX

Hoofdwapening langsrichting

Hoofdwapening dwarsrichting

Smart Aggregate
Richting Piezo-electric i.o.m. hoofd draagrichting dek

'Wandelstok' ø10



AANZICHT LANGRICHTING DEK

AANZICHT DWARSRICHTING DEK

SENSOREN KW9 POSITIE 3

4x UITVOEREN

BIJLAGE C – LOGBOEKEN METINGEN

11:54 21-9-2020

Setup equipment
Using Proceq
Voltage 100V
Stacking 10
Gain 5

Position 1

Sender to CH00 File 1664
Measurement disordered
Gain 1
Stacking 30
Sender to CH00 File 1665
Measurement still clipped

Optimalization connectors
Sender to CH00 file 1666
Y Yang: "measurement looks good"

Sender to CH01 file 1667
Sender to CH02 file 1668
Sender to CH03 file 1669
Sender to CH04 file 1670
Sender to CH05 file 1671
Sender to CH06 file 1672
Sender to CH07 file 1673

12:55 21-9-2020

13:33 21-9-2020
Position 2

100V
30 stacking
Gain 1

Sender to CH0 file 1674
Sender to CH0 file 1675 herhalingsmeting
Sender to CH0 file 1676 herhalingsmeting mux2_000 0tm11 voor de zekerheid

Sender to CH01 file 1677
Sender to CH02 file 1678
Sender to CH03 file 1679
Sender to CH04 file 1680
Sender to CH05 file 1681
Sender to CH06 file 1682
Sender to CH07 file 1683
Sender to CH08 file 1684
Sender to CH09 file 1685
Sender to CH10 file 1686
Sender to CH11 file 1687

14:34 21-9-2020

14:49 21-9-2020

Position 3
mux2_000 0tm12
200V
Gain 1

Sender to CH0 file 1688 wrong measurement
Sender to CH0 file 1689
Sender to CH1 file 1690
Sender to CH2 file 1691
Sender to CH3 file 1692
Sender to CH4 file 1693
Sender to CH5 file 1694
Sender to CH6 file 1695
Sender to CH7 file 1696
Sender to CH8 file 1697
Sender to CH9 file 1698
Sender to CH10 file 1699
Sender to CH11 file 1700
Sender to CH12 file 1701
Sender to CH13 file 1702

15:48 21-9-2020

Position 4
100V
gain 1
mux2_000 0tm11

15:57 21-9-2020

Sender to CH0 file 1703
Sender to CH1 file 1704
Sender to CH2 file 1705
Sender to CH3 file 1706
Sender to CH4 file 1707
Sender to CH5 file 1708
Sender to CH6 file 1709
Sender to CH7 file 1710
Sender to CH8 file 1711
Sender to CH9 file 1712
Sender to CH10 file 1713
Sender to CH11 file 1714

End of measurement

16:39 21-9-2020

Meting03 25-09-2020

20:17 25-9-2020

Measurement 100% tension, before ontkisten
lot of rain

Position 1

100v

Stacking 10x

Sender to CH0 file 1715

Staking 30x

Sender to CH0 file 1716

Return to Stacking 10x

Sender to CH1 file 1717

Sender to CH2 file 1718

Sender to CH3 file 1719

Sender to CH4 file 1720

Sender to CH5 file 1721

Sender to CH6 file 1722

Sender to CH7 file 1723

21:00 25-9-2020

Position2

100V

Stacking 10

Sender to CH0 file 1724 wrng measurent

Sender to CH0 file 1725 wrong measurement

Sender to CH0 file 1726

Sender to CH1 file 1727

Sender to CH2 file 1728

Sender to CH3 file 1729

Sender to CH4 file 1730

Sender to CH5 file 1731

Sender to CH6 file 1732

Sender to CH7 file 1733

Sender to CH8 file 1734

Sender to CH9 file 1735

Sender to CH10 file 1736

Sender to CH11 file 1737

21:33 25-9-2020

21:49 25-9-2020

Position 3

200V

stacking 10

sender to CH0 file 1738

sender to CH1 file 1739

sender to CH2 file 1740

sender to CH3 file 1741

sender to CH4 file 1742

sender to CH5 file 1743

sender to CH6 file 1744
sender to CH7 file 1745
sender to CH8 file 1746
sender to CH9 file 1747
sender to CH10 file 1748
sender to CH11 file 1749
sender to CH12 file 1750
sender to CH13 file 1751

end of measurement due to rain and wind

22:17 25-9-2020

12:21 30-10-2020

Measurement before casting stage 2. The form of stage 1 has been removed

Position 4

100V

Stacking count 10

Sender to CH0 File 1755
Sender to CH1 File 1756
Sender to CH2 File 1757
Sender to CH3 File 1758
Sender to CH4 File 1759
Sender to CH5 File 1760
Sender to CH6 File 1761
Sender to CH7 File 1762
Sender to CH8 File 1763
Sender to CH9 File 1764
Sender to CH10 File 1765
Sender to CH11 File 1766

12:47 30-10-2020

Position 3

200V

Stacking count 10

Sender to CH0 File 1767
Sender to CH1 File 1768
Sender to CH2 File 1769
Sender to CH3 File 1770
Sender to CH4 File 1771
Sender to CH5 File 1772
Sender to CH6 File 1773
Sender to CH7 File 1774
Sender to CH8 File 1775
Sender to CH9 File 1776
Sender to CH10 File 1777
Sender to CH11 File 1778
Sender to CH12 File 1779
Sender to CH13 File 1780

13:17 30-10-2020

Position 2

100V

Stacking 10

Sender to CH0 File 1781 wrong
Sender to CH0 File 1782
Sender to CH1 File 1783
Sender to CH2 File 1784
Sender to CH3 File 1785
Sender to CH4 File 1786

Sender to CH5 File 1787
Sender to CH6 File 1788
Sender to CH7 File 1789
Sender to CH8 File 1790
Sender to CH9 File 1791
Sender to CH10 File 1792
Sender to CH11 File 1793

13:50 30-10-2020

Position 1

100V

Stacking 10

Sender to CH0 File 1794
Sender to CH1 File 1795
Sender to CH2 File 1796
Sender to CH3 File 1797
Sender to CH4 File 1798
Sender to CH5 File 1799
Sender to CH6 File 1800
Sender to CH7 File 1801

14:08 30-10-2020 End of measurement

13:32 17-12-2020

Measurement after loose form stage 2. Stage 3 in progress, not casted

Position 1

100V

Stacking count 10

14:01 17-12-2020

Sender to CH0 File 1864

Sender to CH1 file 1865

Sender to CH2 file 1866

Sender to CH3 file 1867

Sender to CH4 file 1868

Sender to CH5 file 1869

Sender to CH6 file 1870

Sender to CH7 file 1871

14:11 17-12-2020

Position 2

100V

Stacking count 10

14:15 17-12-2020

Sender to CH0 File 1872

Sender to CH1 file 1873

Sender to CH2 file 1874

Sender to CH3 file 1875

Sender to CH4 file 1876

Sender to CH5 file 1877

Sender to CH6 file 1878

Sender to CH7 file 1879

Sender to CH8 file 1880

Sender to CH9 file 1881

Sender to CH10 file 1882

Sender to CH11 file 1883

14:38 17-12-2020

14:47 17-12-2020

Position 3

200V

Stacking count 10

Sender to CH0 File 1884 wrong measurement

Sender to CH0 File 1885

Sender to CH1 file 1886

Sender to CH2 file 1887

Sender to CH3 file 1888

Sender to CH4 file 1889

Sender to CH5 file 1890

Sender to CH6 file 1891

Sender to CH7 file 1892

Sender to CH8 file 1893

Sender to CH9 file 1894
Sender to CH10 file 1895
Sender to CH11 file 1896
Sender to CH12 file 1897
Sender to CH13 file 1898

Position 4
15:12 17-12-2020

Sender to CH0 File 1899
Sender to CH1 file 1900
Sender to CH2 file 1901
Sender to CH3 file 1902
Sender to CH4 file 1903
Sender to CH5 file 1904
Sender to CH6 file 1905
Sender to CH7 file 1906
Sender to CH8 file 1907
Sender to CH9 file 1908
Sender to CH10 file 1909
Sender to CH11 file 1910

15:42 17-12-2020

BIJLAGE D – MATLAB CODES


```
% This script picks first arrival and does CWI
% v1.0: Fengqiao Zhang, Oct.14, 2020
% v1.1: Hao Cheng, June.13, 2021
```

```
clc;
clear all;
set(0,'DefaultAxesFontName','Times New Roman');
set(0,'DefaultTextFontName','Times New Roman');
set(0,'DefaultAxesFontSize',14);
set(0,'DefaultTextFontSize',14);
set(0,'defaultlinelength',2);
```

```
%% read measurement
```

```
load('C:\Users\qjle\OneDrive - boskalis.com\Werkmap\4\
Opleidingen\MSENG\3e_jaar\Afstuderen\03._Werkmap\04._Analyse\04. Afstemming Ha
Cheng\Plotcode\POS_3_meting2-5');
```

```
% information
```

```
Position(3).Meting(2).src=0:13;
for i=0:13
    Position(3).Meting(2).info(1,i+1)=alldata(4*i+1).info;
end
Position(3).Meting(3).src=0:13;
for i=0:13
    Position(3).Meting(3).info(1,i+1)=alldata(4*i+2).info;
end
Position(3).Meting(4).src=0:13;
for i=0:13
    Position(3).Meting(4).info(1,i+1)=alldata(4*i+3).info;
end
Position(3).Meting(5).src=0:13;
for i=0:13
    Position(3).Meting(5).info(1,i+1)=alldata(4*i+4).info;
end
```

```
% index from the file
```

```
src = zeros(1,length(alldata));
info = zeros(1,length(alldata));
for ii = 1:length(alldata)
    src(ii) = alldata(ii).src;
    info(ii) = alldata(ii).info;
end
```

```
%% select first arrival
```

```
for ii=1:length(alldata)
    for jj=1:14 % channel number
        sig=alldata(ii).wave(:,jj)-mean(alldata(ii).wave(151:240,jj));
        fs=3e6; % sampling frequency 3e6 Hz
        t=1/fs:1/fs:4000/fs;
        tu=t';
        dtu=1/fs;
        id=find(tu>50e-6);
        [Hin,arvt]=Hinkley_pick(sig(id),t(id),0);
        alldata(ii).arvt(jj)=arvt;
    end
end
```

```
%% take the example to show the result
```

```

pos=3; % select the position of measurement position 1-4
reclg=14; % how many sensors at that position
id=7; % which measurement is taken from that position Source / Sender you want
close all ;

```

```

for meting=3
    srcv=Position(pos).Meting(meting).src(id);
    infov=Position(pos).Meting(meting).info(id);
    ind=find(src==srcv&info==infov);
    fs=3e6;
    t=1/fs:1/fs:4000/fs;
    ch=alldata(ind).ch;
    sig=alldata(ind).wave;
    arvt=alldata(ind).arvt;
    % plot waves
    rg=max(abs(sig(:)));
    for ii=[9]
        figure();clf; hold on;
        %subplot(reclg/2,2,ii); hold on;
        plot(t,sig(:,ii),'k-')
        plot(arvt(ii)*[1 1],[-11 11],'r:');
        xlabel('Time [s]');
        ylabel('Amplitude [V]');
        ylim([-11 11]);
        title(['File' num2str(infov) ', Pos ' num2str(pos) ', Meting ' num2str(meting) ': S' num2str(srcv) ' → R' num2str(ch(ii))]);
        box on;
    end
end

```

```

%% coda wave interferometry
% here, only CWI for one sensor pair is performed. TO perform for all
% sensor pairs, you can add loops by changing 'pos (with related reclg)',
% and 'id'

```

```

pos=3;
reclg=14;
id=6; % select the sender
close all ;
for meting=2:5
    srcv=Position(pos).Meting(meting).src(id);
    infov=Position(pos).Meting(meting).info(id);
    ind=find(src==srcv&info==infov);
    Meting(meting).t=alldata(ind).time;
    Meting(meting).ch=alldata(ind).ch(1:reclg);
    Meting(meting).sig=alldata(ind).wave(:,1:reclg);
    Meting(meting).arvt=alldata(ind).arvt(1:reclg);
    Meting(meting).src=srcv;
end

```

```

% select reference
rtest=3; % reference test, meting
recid=14; % select the receiver
t0=Meting(rtest).arvt(recid);
ref=Meting(rtest).sig(:,recid)-mean(Meting(rtest).sig(151:240,recid));
ch=Meting(rtest).ch(recid);
fs=3e6;
t=1/fs:1/fs:4000/fs;

```

```

% select signal
stest=4 ; % stressed test, meting
sig=Meting(stest).sig(:,recid)-mean(Meting(stest).sig(151:240,recid));

% plot reference signal and compressed signal
rg=max(abs([ref;sig]));
figure(4);
hold on;
plot(t,ref,'b')
plot(t,sig,'r')
plot(t0*[1 1],[-1 1]*rg,'k:');
grid on
grid minor
xlabel('Time [s]');
ylabel('Amplitude [V]');
ylim([-1 1]*rg);
title(['POS' num2str(pos) ': S' num2str(Meting(rtest).src) ' → R' num2str(ch)]);
subtitle(['M' num2str(stest) ' → M' num2str(rtest)]);
box on;
legend(['Meting ' num2str(rtest), ', Referentie' ],['Meting ' num2str(stest),', ↵
Vergelijking'], 'First arrival')
%% stretching
% define window
fs=3e6;
t=1/fs:1/fs:4000/fs;
tu=t';
dtu=1/fs;
f=50; %[kHz]
p=1/(f*1e3); %[s]
wndlg=10*p; % window length, 10 times period
wndst=(t0):wndlg/2:(max(tu)-wndlg); % select start of windows, with half overlapped
% stretching
epsilon=-5e-2:1e-3:5e-2; % test epsilon value
EPS=zeros(1, length(wndst));
CC=zeros(1, length(wndst));
COEF_CORR=zeros(length(epsilon), length(wndst));
for ii=1:length(wndst)
    tid1=fix(wndst(ii)/dtu); % start point of each window
    tid2=tid1+fix(wndlg/dtu); % end point of each window
    time_window=tid1:tid2; % window range
    [eps,cc,coef_corr,~]=stretching_LCPC(sig,ref,tu,epsilon,time_window,0); %↵
stretching
    [pk, loc]=findpeaks(coef_corr);
    [pkm, idm] = max(pk);
    EPS(ii)=epsilon(loc(idm));
    CC(ii)=pk(idm);
    COEF_CORR(:,ii)=coef_corr;
end

wid=2;
close all
figure(5);
subplot(2,1,1);hold on;
plot(tu,ref,'b')
plot(tu,sig,'r')
%plot(t0*[1 1],[-1 1]*rg,'k:');
plot (wndst(wid)*[1 1],[-1 1]*rg,'black:');
plot((wndst(wid)+(wndlg))*[1 1],[-1 1]*rg,'black:');

```

```

grid on
grid minor
xlabel('Time [s]');
xlim(tu([1 end]))
ylabel('Amplitude [V]');
ylim([-1 1]*rg);
title(['P' num2str(pos) ': S' num2str(Meting(rtest).src) '→ R' num2str(ch)]);
subtitle(['M' num2str(stest) ' → M' num2str(rtest)]);
box on;
legend(['Meting ' num2str(rtest), ', Referentie' ], ['Meting ' num2str(stest), ', ↙
Vergelijking'], 'window')
subplot(2,1,2);
yyaxis left;
plot(wndst,EPS)
grid on
grid minor
xlabel('Time [s]');
xlim(tu([1 end]))
ylabel('dv/v [-]')
yyaxis right;
plot(wndst,CC)
ylabel('CC [-]')
box on;

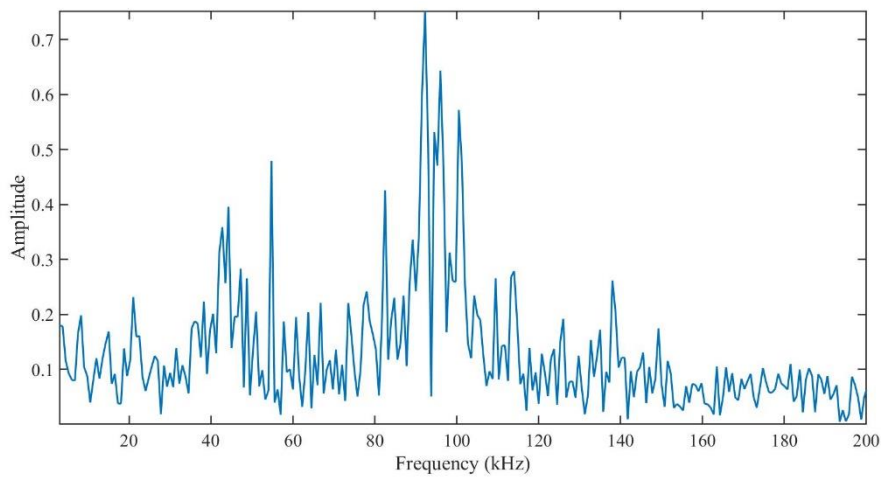
figure(6);
[Peak, PeakIdx] = findpeaks(COEF_CORR(:,wid));
[Peakm, PeakIdxm] = max(Peak);
epk=epsilon(PeakIdx);
epkm=epk(PeakIdxm);
sgtitle(['POS' num2str(pos) ': S' num2str(Meting(rtest).src) '→R' num2str(ch) ', ↙
M' num2str(stest) '→M' num2str(rtest) ', Window: ' num2str(wid)], 'FontSize',18, ↙
'Fontweight','bold', 'FontName','Arial');
subplot(1,3,1);hold on;
pt = find(tu>=wndst(wid)&tu<wndst(wid+1));
plot(tu(pt),ref(pt),'b');
plot(tu(pt),sig(pt),'r');
grid on
grid minor
title ('Voor stretching')
xlabel('Time [s]');
ylabel('Amplitude [V]');
box on;
subplot(1,3,2);hold on;
tu2=tu(pt)*(1+EPS(wid));
synt=interp1(tu(pt),ref(pt),tu2,'spline');
plot(tu(pt),synt,'b');
plot(tu(pt),sig(pt),'r');
grid on
grid minor
title ('Na stretching')
xlabel('Time [s]');
ylabel('Amplitude [V]');
box on;
subplot(1,3,3);hold on;
plot(epsilon,COEF_CORR(:,wid),'k'); hold on;
plot(epkm,Peakm,'o', 'markerfacecolor',[1 0 0]);
text(epkm+0.01,Peakm-0.05,sprintf('CC =%6.3f',Peakm), 'Color','r');
text(epkm+0.01,Peakm,sprintf('dv/v =%6.3f',epkm), 'Color','r');

```

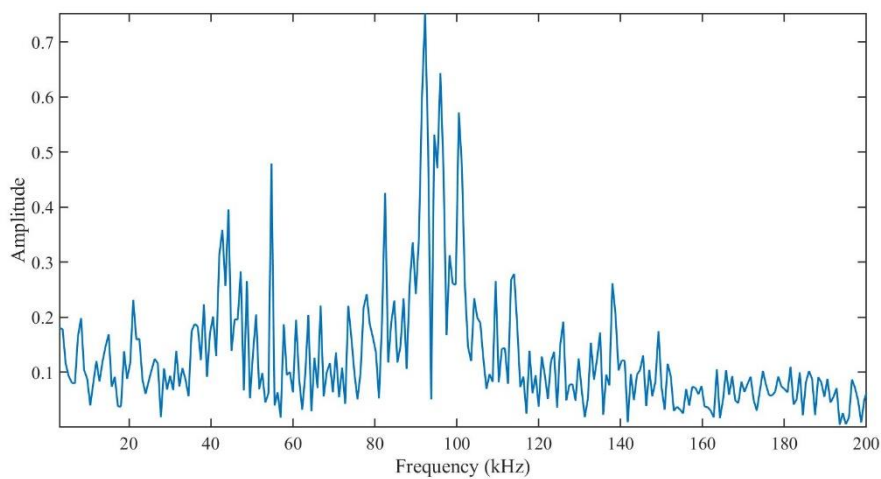
BIJLAGE E – FFT-ANALYSE

FFT-Analyse

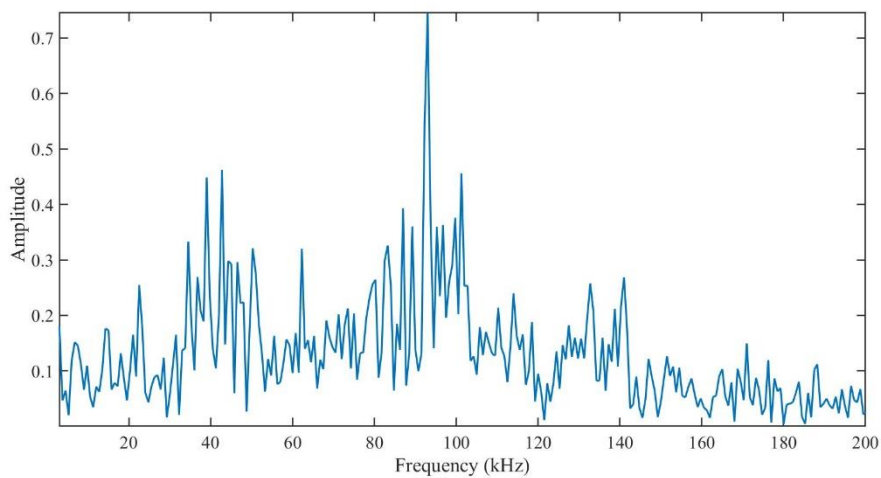
File 1694



File 1771



File 1889



BIJLAGE F – SPANNINGSFIGUREN EN -TOESTAND

Bijlage F.1 – Spanningen

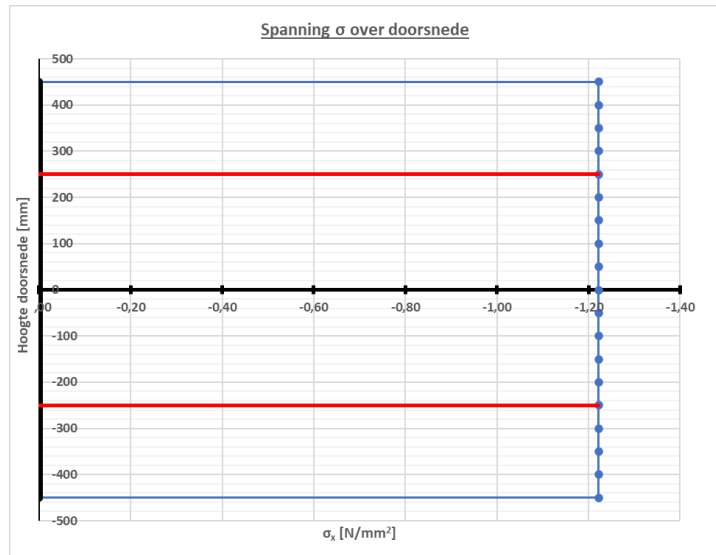
Bijlage F.1 – Spanningsfiguren.....	2
1.1 Spanningsfiguur ten tijde van meting 2.....	2
1.2 Spanningsfiguur ten tijde van meting 3.....	2
1.3 Spanningsfiguur ten tijde van meting 4.....	3
1.4 Spanningsfiguur ten tijde van meting 5.....	3

BIJLAGE F.1 – SPANNINGSFIGUREN

In deze bijlage zijn de spanningsfiguren opgenomen ten tijde van de verschillende meetmomenten. De figuren zijn bepaald voor POS 3.

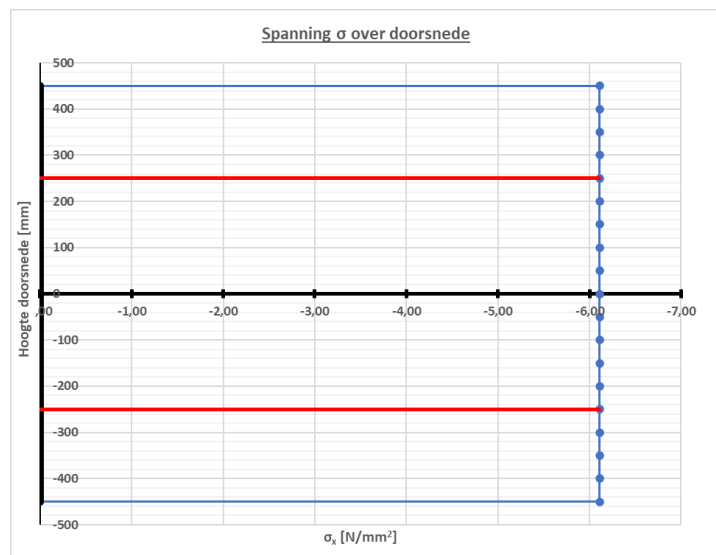
1.1 Spanningsfiguur ten tijde van meting 2

Normaalkracht	N =	-1100 [kN/m]
Moment	M=	0 [kNm/m]
Dwarskracht	V=	- [kN/m]
Breedte	b=	1000 [mm]
Hoogte	h=	900 [mm]
Zwaartepunt	zp =	450 [mm]
Traagheidsmoment	I_y =	6,08E+10 [mm ⁴]
Weerstandsmoment	W_y=	1,35E+08 [mm ³]



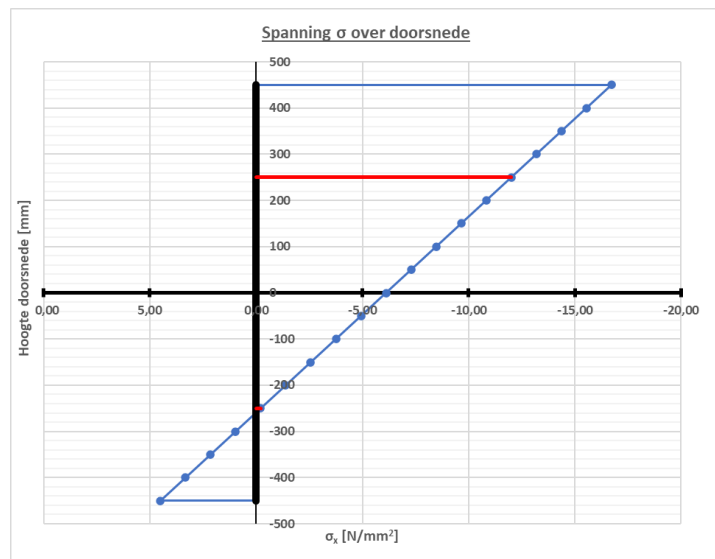
1.2 Spanningsfiguur ten tijde van meting 3

Normaalkracht	N =	-5500 [kN/m]
Moment	M=	0 [kNm/m]
Dwarskracht	V=	- [kN/m]
Breedte	b=	1000 [mm]
Hoogte	h=	900 [mm]
Zwaartepunt	zp =	450 [mm]
Traagheidsmoment	I_y =	6,08E+10 [mm ⁴]
Weerstandsmoment	W_y=	1,35E+08 [mm ³]



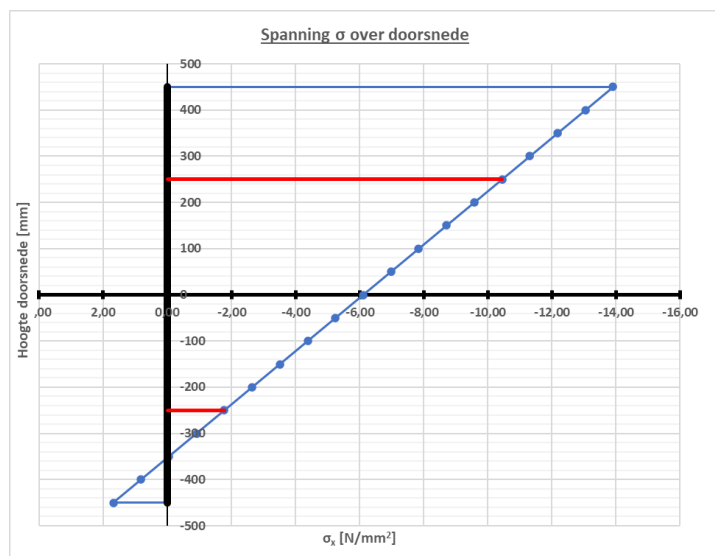
1.3 Spanningsfiguur ten tijde van meting 4

Normaalkracht	N =	-5500 [kN/m]
Moment	M=	1433 [kNm/m]
Dwarskracht	V=	- [kN/m]
Breedte	b=	1000 [mm]
Hoogte	h=	900 [mm]
Zwaartepunt	zp =	450 [mm]
Traagheidsmoment	I_y =	6,08E+10 [mm ⁴]
Weerstandsmoment	W_y=	1,35E+08 [mm ³]



1.4 Spanningsfiguur ten tijde van meting 5

Normaalkracht	N =	-5500 [kN/m]
Moment	M=	1053 [kNm/m]
Dwarskracht	V=	- [kN/m]
Breedte	b=	1000 [mm]
Hoogte	h=	900 [mm]
Zwaartepunt	zp =	450 [mm]
Traagheidsmoment	I_y =	6,08E+10 [mm ⁴]
Weerstandsmoment	W_y=	1,35E+08 [mm ³]



Bijlage F.2 – Spanningen en spanningstoestand

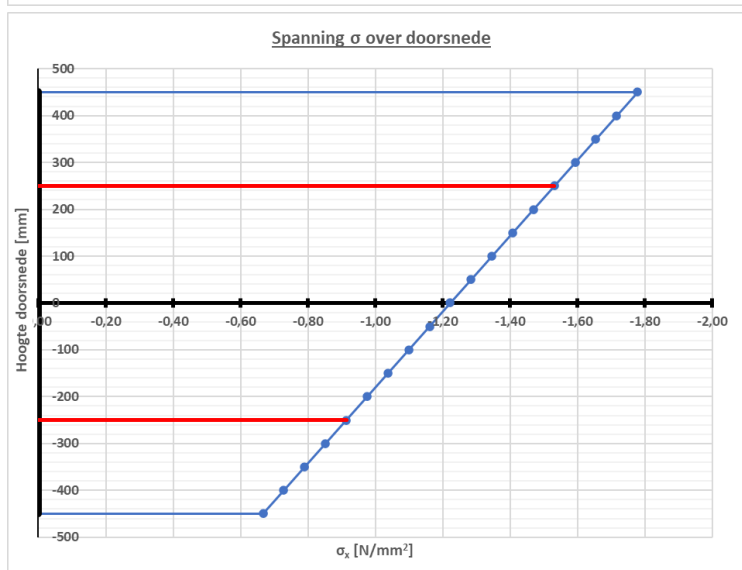
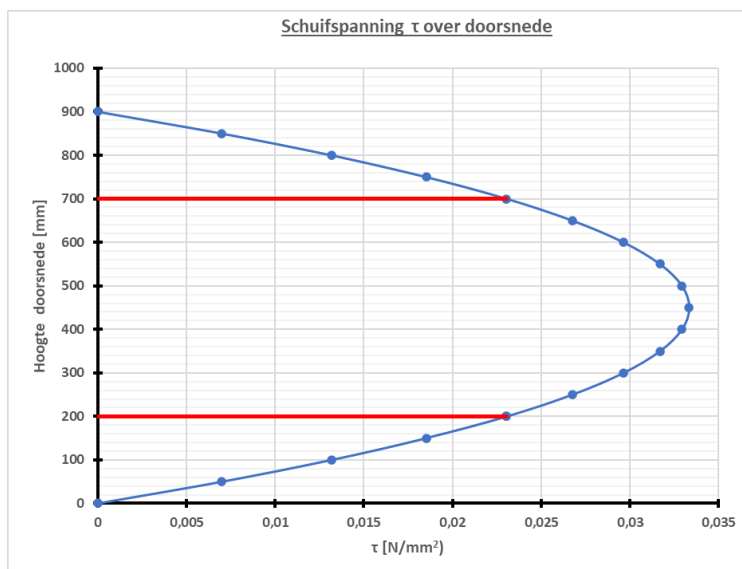
1	Bijlage F.2 – Spanningsfiguren en -toestand	2
1.1	Spanningsfiguren ten tijde van meting 2	2
1.2	Spanningstoestand ten tijde van meting 2	3
1.3	Spanningsfiguren ten tijde van meting 3	4
1.4	Spanningstoestand ten tijde van meting 3	5
1.5	Spanningsfiguren ten tijde van meting 4	6
1.6	Spanningstoestand ten tijde van meting 4	7
1.7	Spanningsfiguren ten tijde van meting 5	8
1.8	Spanningstoestand ten tijde van meting 5	9

1 BIJLAGE F.2 – SPANNINGSFIGUREN EN -TOESTAND

In deze bijlage zijn de spanningsfiguren en de spanningstoestand opgenomen ten tijde van de verschillende meetmomenten. De figuren zijn bepaald voor POS 3. De figuren zijn inclusief de beschouwde invloed van de ondersteuning.

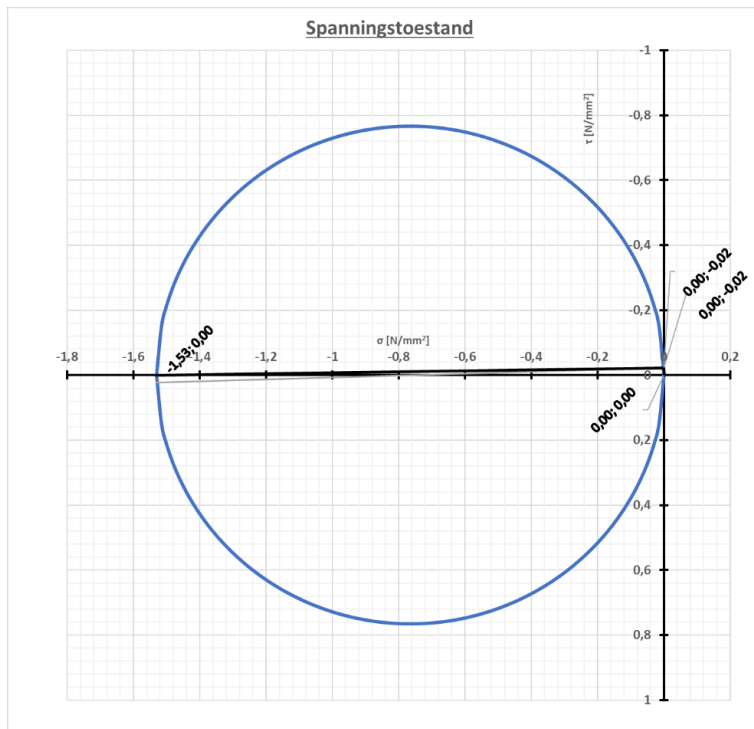
1.1 Spanningsfiguren ten tijde van meting 2

Normaalkracht	N =	-1100 [kN/m]
Moment	M=	75 [kNm/m]
Dwarskracht	V=	20 [kN/m]
Breedte	b=	1000 [mm]
Hoogte	h=	900 [mm]
Zwaartepunt	zp =	450 [mm]
Traagheidsmoment	I_y =	6,08E+10 [mm ⁴]
Weerstandsmoment	W_y=	1,35E+08 [mm ³]



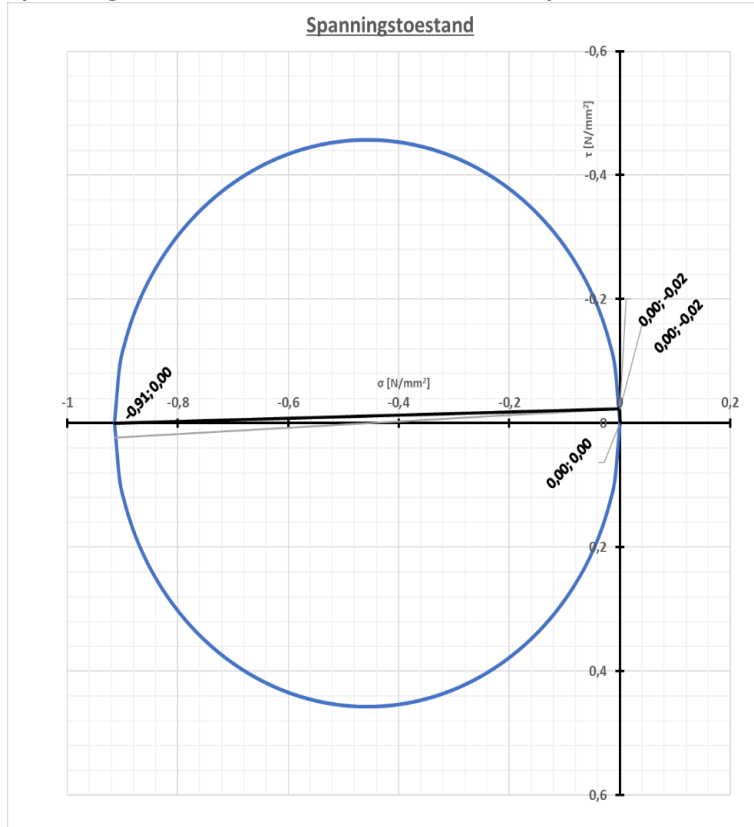
1.2 Spanningstoestand ten tijde van meting 2

Spanningstoestand 200mm vanaf de bovenzijde



Hoofdspanning max	$\sigma_1 =$	0,00 [N/mm ²]
Hoofdspanning min	$\sigma_2 =$	-1,53 [N/mm ²]
Max. schuifspanning	$\tau_{\max} =$	0,77 [N/mm ²]
Hoek hoofdspanning	$\theta_1 =$	-0,9 [°]

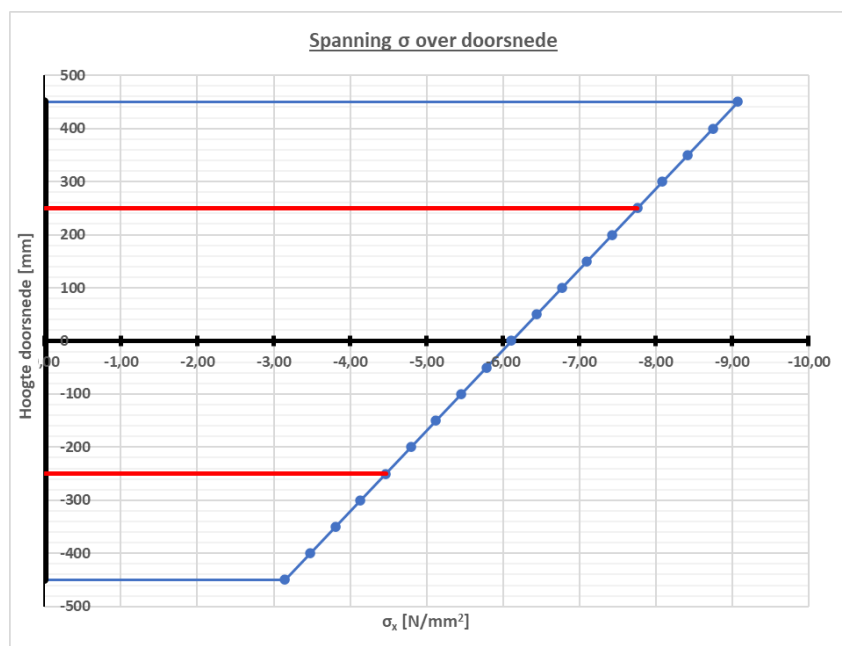
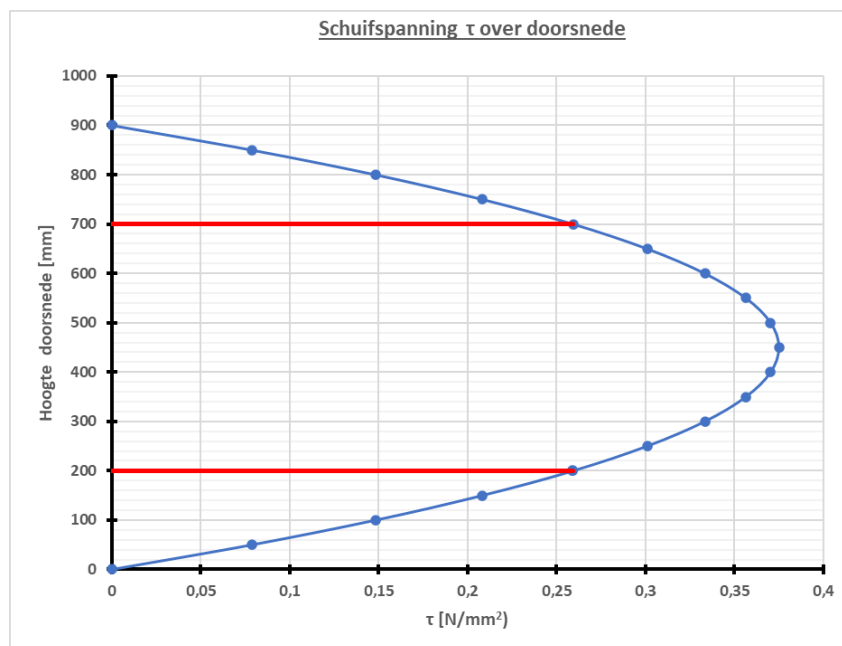
Spanningstoestand 200mm vanaf de onderzijde



Hoofdspanning max	$\sigma_1 =$	0,00 [N/mm ²]
Hoofdspanning min	$\sigma_2 =$	-0,91 [N/mm ²]
Max. schuifspanning	$\tau_{\max} =$	0,46 [N/mm ²]
Hoek hoofdspanning	$\theta_1 =$	-1,4 [°]

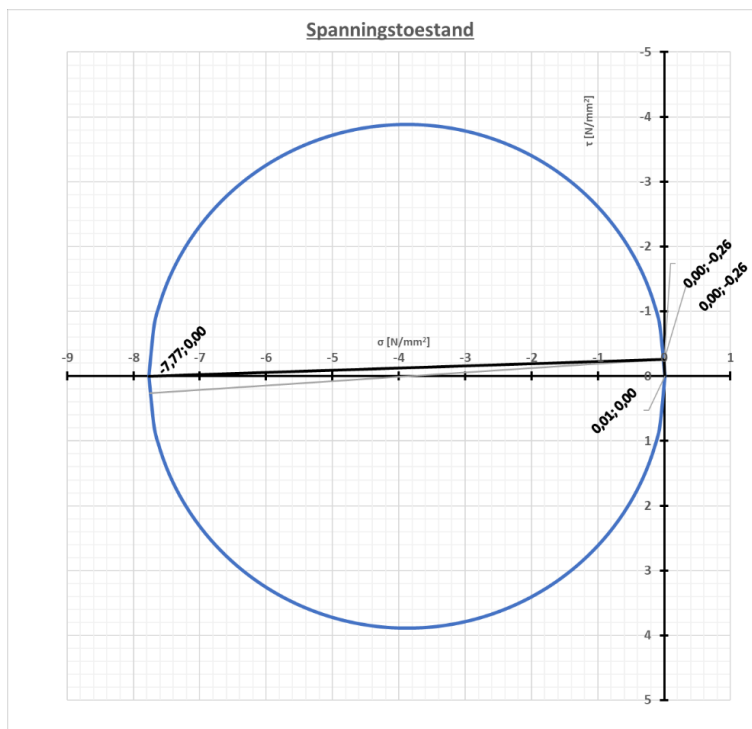
1.3 Spanningsfiguren ten tijde van meting 3

Normaalkracht	N =	-5500 [kN/m]
Moment	M=	400 [kNm/m]
Dwarskracht	V=	225 [kN/m]
Breedte	b=	1000 [mm]
Hoogte	h=	900 [mm]
Zwaartepunt	zp =	450 [mm]
Traagheidsmoment	I_y =	6,08E+10 [mm ⁴]
Weerstandsmoment	W_y=	1,35E+08 [mm ³]



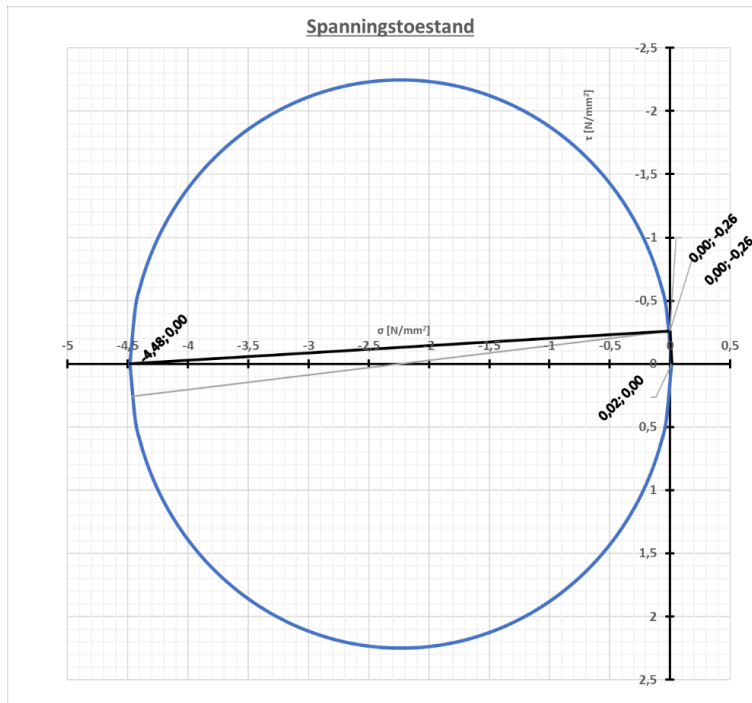
1.4 Spanningstoestand ten tijde van meting 3

Spanningstoestand 200mm vanaf de bovenzijde



Hoofdspanning max	$\sigma_1 =$	0,01 [N/mm ²]
Hoofdspanning min	$\sigma_2 =$	-7,77 [N/mm ²]
Max. schuifspanning	$\tau_{max} =$	3,89 [N/mm ²]
Hoek hoofdspanning	$\theta_1 =$	-1,9 [°]

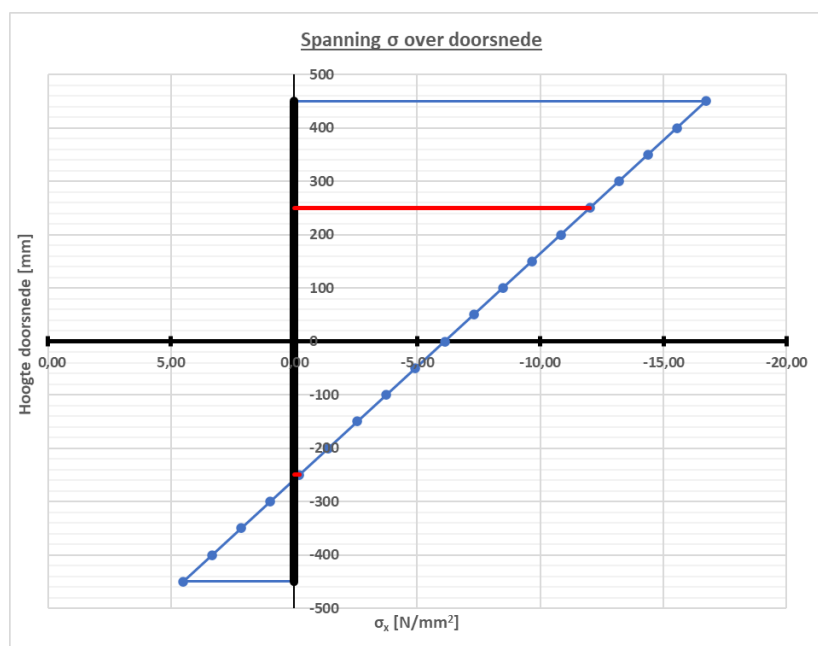
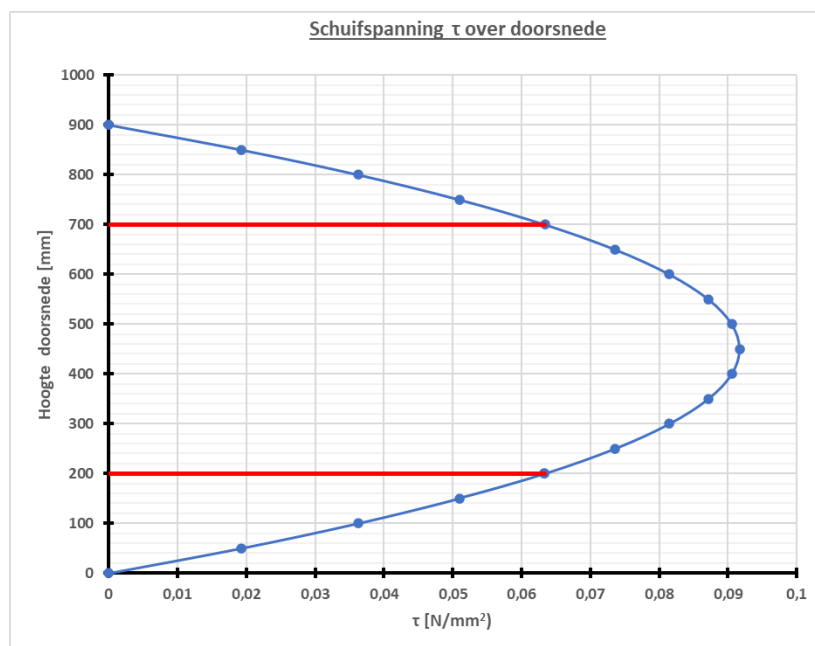
Spanningstoestand 200mm vanaf de onderzijde



Hoofdspanning max	$\sigma_1 =$	0,02 [N/mm ²]
Hoofdspanning min	$\sigma_2 =$	-4,48 [N/mm ²]
Max. schuifspanning	$\tau_{max} =$	2,25 [N/mm ²]
Hoek hoofdspanning	$\theta_1 =$	-3,3 [°]

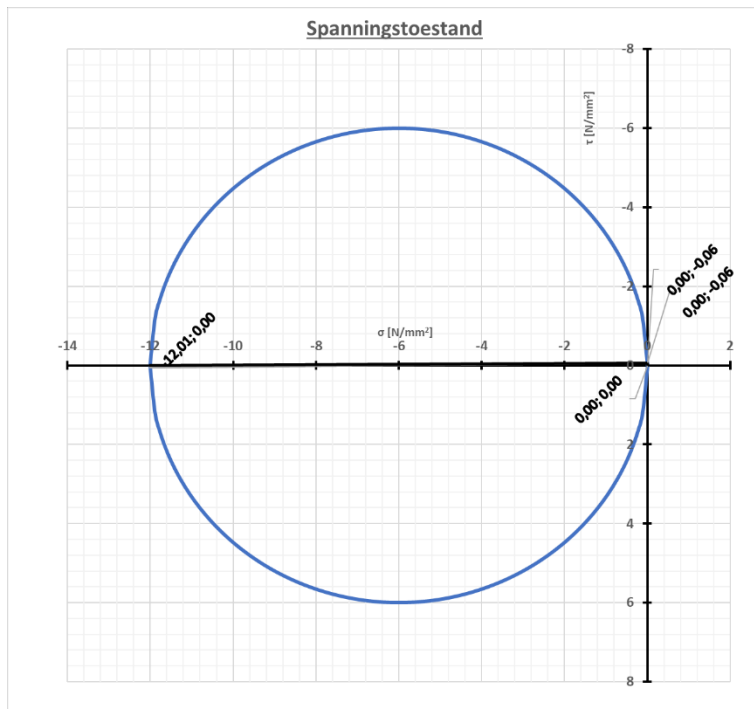
1.5 Spanningsfiguren ten tijde van meting 4

Normaalkracht	N =	-5500 [kN/m]
Moment	M=	1433 [kNm/m]
Dwarskracht	V=	55 [kN/m]
Breedte	b=	1000 [mm]
Hoogte	h=	900 [mm]
Zwaartepunt	zp =	450 [mm]
Traagheidsmoment	I_y =	6,08E+10 [mm ⁴]
Weerstandsmoment	W_y=	1,35E+08 [mm ³]



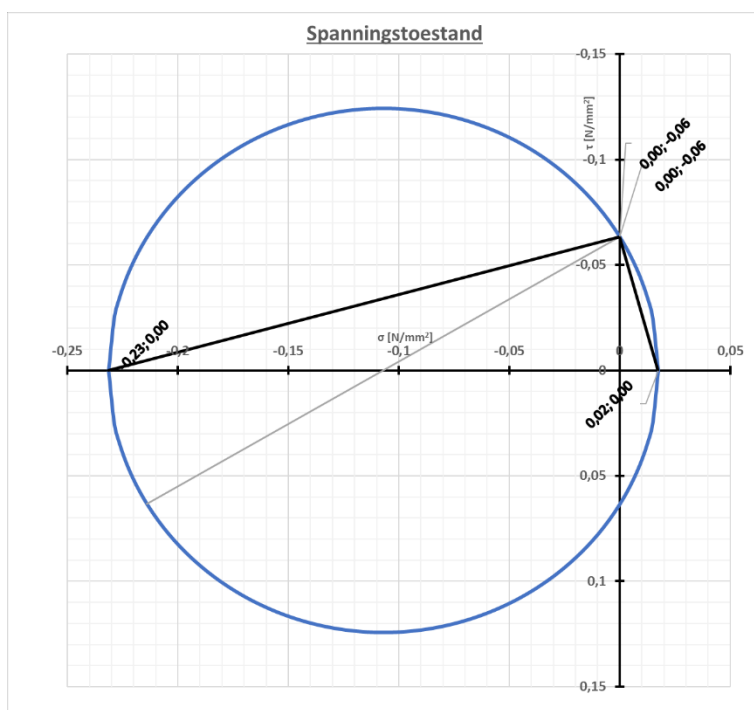
1.6 Spanningstoestand ten tijde van meting 4

Spanningstoestand 200mm vanaf de bovenzijde



Hoofdspanning max	$\sigma_1 =$	0,00 [N/mm ²]
Hoofdspanning min	$\sigma_2 =$	-12,01 [N/mm ²]
Max. schuifspanning	$\tau_{\max} =$	6,00 [N/mm ²]
Hoek hoofdspanning	$\theta_1 =$	-0,3 [°]

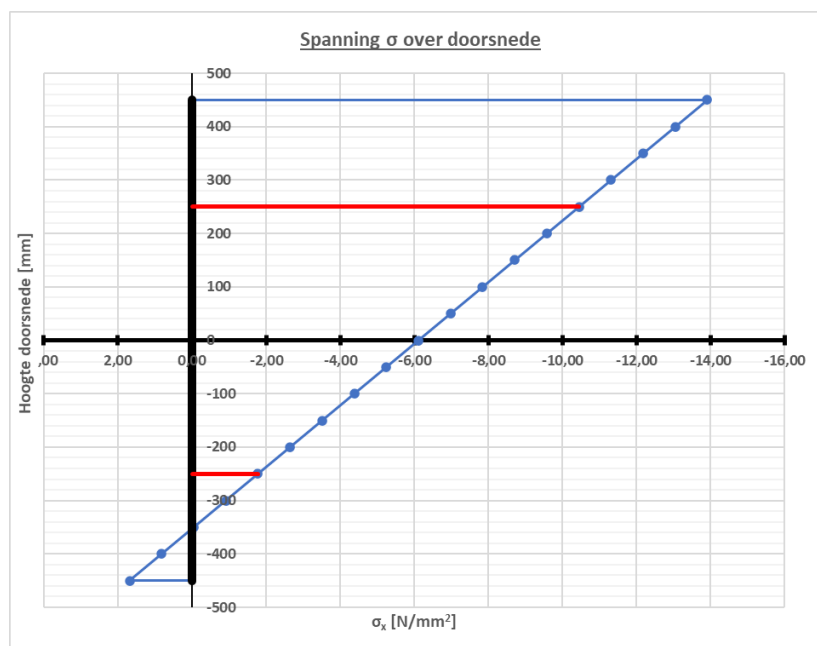
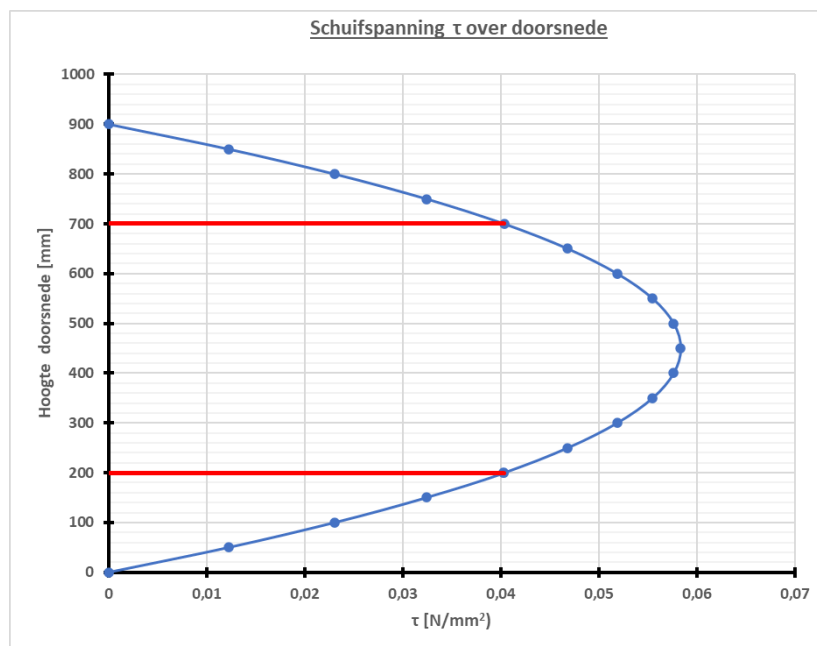
Spanningstoestand 200mm vanaf de onderzijde



Hoofdspanning max	$\sigma_1 =$	0,02 [N/mm ²]
Hoofdspanning min	$\sigma_2 =$	-0,23 [N/mm ²]
Max. schuifspanning	$\tau_{\max} =$	0,12 [N/mm ²]
Hoek hoofdspanning	$\theta_1 =$	-15,3 [°]

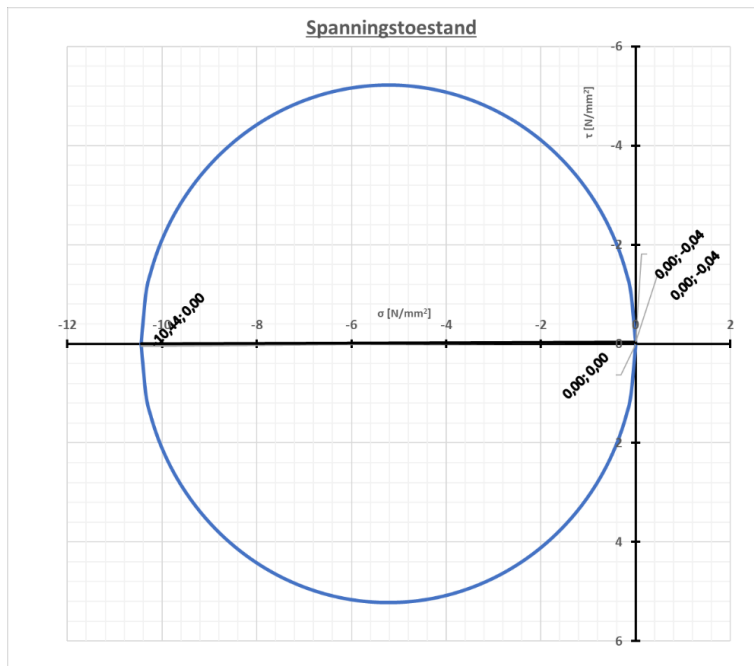
1.7 Spanningsfiguren ten tijde van meting 5

Normaalkracht	N =	-5500 [kN/m]
Moment	M=	1053 [kNm/m]
Dwarskracht	V=	35 [kN/m]
Breedte	b=	1000 [mm]
Hoogte	h=	900 [mm]
Zwaartepunt	zp =	450 [mm]
Traagheidsmoment	I_y =	6,08E+10 [mm ⁴]
Weerstandsmoment	W_y=	1,35E+08 [mm ³]



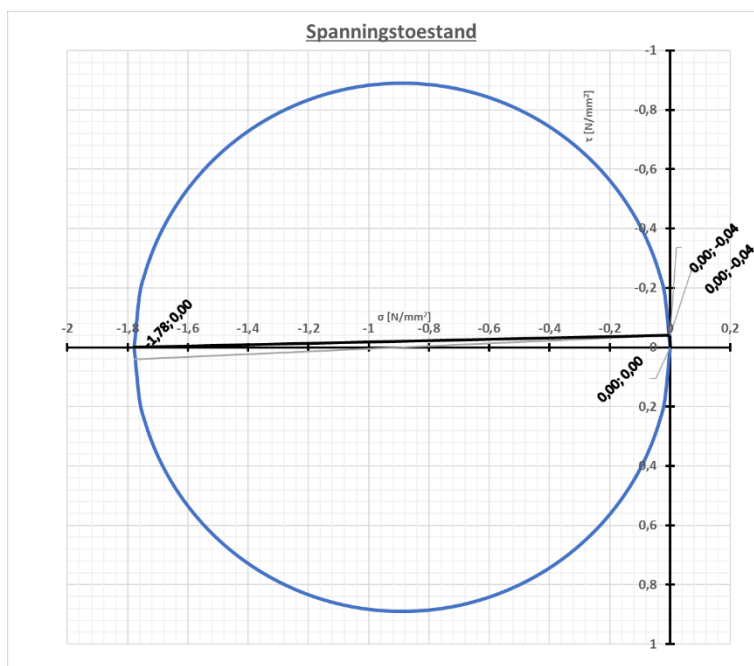
1.8 Spanningstoestand ten tijde van meting 5

Spanningstoestand 200mm vanaf de bovenzijde



Hoofdspanning max	$\sigma_1 =$	0,00 [N/mm²]
Hoofdspanning min	$\sigma_2 =$	-10,44 [N/mm²]
Max. schuifspanning	$\tau_{max} =$	5,22 [N/mm²]
Hoek hoofdspanning	$\theta_1 =$	-0,2 [°]

Spanningstoestand 200mm vanaf de onderzijde



Hoofdspanning max	$\sigma_1 =$	0,00 [N/mm²]
Hoofdspanning min	$\sigma_2 =$	-1,78 [N/mm²]
Max. schuifspanning	$\tau_{max} =$	0,89 [N/mm²]
Hoek hoofdspanning	$\theta_1 =$	-1,3 [°]

BIJLAGE G – M-N-K-DIAGRAMMEN

M-N-K – Diagram meting 2

Omschrijving	Grootte	Eenheid
Breedte doorsnede	$b =$	1000 [mm]
Hoogte doorsnede	$h =$	900 [mm]
Dekking	$a =$	68 [mm]
Betondruksterkte	$f_{cd} =$	30 [N/mm ²]
Betontreksterkte	$f_{ctm} =$	3.8 [N/mm ²]
Rek betonsluit	$\epsilon_{c3} =$	1,75E-03 [-]
Grenswaarde rek	$\epsilon_{cu3} =$	3,50E-03 [-]
Oppervlaktefactor betondrukzone	$\alpha =$	0.75 [-]
Zwaartepunt betondrukzone	$\beta =$	0.39 [-]
Vloei grens wapening	$f_{yd} =$	435 [N/mm ²]
Rek vloei grens wapening	$\epsilon_{sy} =$	2,175E-03 [-]
Elasticiteitsmodulus beton	$E_c =$	17142.86 [N/mm ²]
Elasticiteitsmodulus wapening	$E_s =$	200000 [N/mm ²]
		$E_c = f_{cd} / \epsilon_{c3}$
Rekenwaarde moment	$M_{Ed} =$	75 [kNm]
Rekenwaarde normaaldruk	$N_{Ed} =$	1100 [kN]
Drukwapening	$A_{s,druk} =$	2011 [mm ²]
Trekwapening	$A_{s,trek} =$	2570 [mm ²]

Bereken scheurmoment

Uitgangspunten

$$\epsilon_c < \epsilon_{c3} \Rightarrow \epsilon_{c,trek} = \alpha_c / E_c$$

$$\epsilon_{c,trek} = 2,22E-04$$

$$\alpha_c < f_{cd}$$

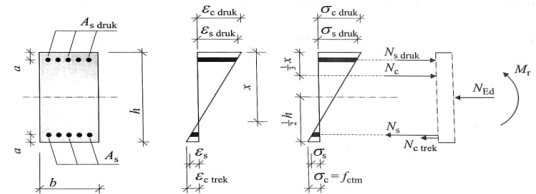
$$\alpha_c < f_{yd}$$

$\Sigma H = 0$	1,50E-04
x_{scheur}	556,81 mm

ϵ_c	3,596E-04	α_c	6,17 [N/mm ²]	N_c	1716 [kN]
$\epsilon_{s,druk}$	3,16E-04	$\alpha_{s,druk}$	63,14 [N/mm ²]	$N_{s,druk}$	127 [kN]
ϵ_s	1,78E-04	α_s	35,55 [N/mm ²]	$N_{s,trek}$	-91 [kN]
$\epsilon_{c,trek}$	2,22E-04	$\alpha_{c,trek}$	3,80 [N/mm ²]	$N_{c,trek}$	-652,1 [kN]
			N_{Ed}		-1100 [kN]
			$\Sigma H = 0$		0 [kN]

Controle uitgangspunten

ϵ_c	<	ϵ_{c3}	Ok
α_c	<	f_{cd}	Ok
α_s	<	f_{yd}	Ok
Scheurmoment	$M_s =$	756,06 [kNm]	
Kromming	$\kappa_s =$	6,46E-04 [m ⁻¹]	
Buigstijfheid	$EI_s =$	1,17E+06 [kNm ²]	



Bereken vloei grens

Uitgangspunten

$$\epsilon_c < \epsilon_{c3}$$

$$\alpha_c < f_{cd}$$

$$\epsilon_s = f_{yd} / E_s = 2,18E-03$$

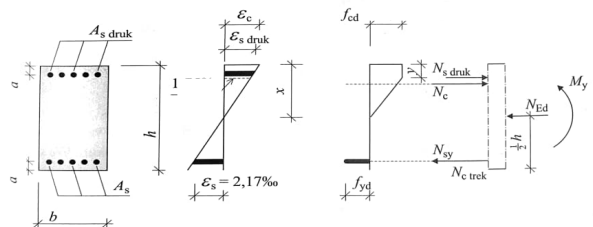
$$\alpha_{s,druk} < f_{yd}$$

$\Sigma H = 0$ als drukwap niet vloeit	3,75607E-05
x_{vloei}	247,29 mm
y	0,0 mm

ϵ_c	9,199E-04	α_c	15,77 [N/mm ²]	$N_{c,vloei}$	1950 [kN]
$\epsilon_{s,druk,vloei}$	6,67E-04	$\alpha_{s,druk}$	133,38 [N/mm ²]	$N_{s,druk,vloei}$	288 [kN]
$\epsilon_{s,vloei}$	2,18E-03	α_s	435,00 [N/mm ²]	$N_{s,vloei}$	-1118 [kN]
			N_{Ed}		-1100,00 [kN]
			$\Sigma H = 0$		0 [kN]

Controle uitgangspunten

ϵ_c	<	ϵ_{c3}	Ok
α_c	<	f_{cd}	Ok
α_s	<	f_{yd}	Ok
ϵ_s	=	ϵ_{sy}	Ok, wapening vloeit
$\epsilon_{s,druk}$	<	ϵ_{sy}	Drukwapening vloeit niet
Vloeimoment	$M_{Ed} =$	1246,18 [kNm]	
Kromming	$\kappa_{c,vloei} =$	3,72E-03 [m ⁻¹]	
Buigstijfheid	$EI_{c,vl} =$	3,35E+05 [kNm ²]	



Betonsluit

Uitgangspunten

$$\epsilon_c = \epsilon_{c3} = 1,75E-03$$

$$\alpha_c = f_{cd} = 30$$

$$\epsilon_{s3} > \epsilon_{sy}$$

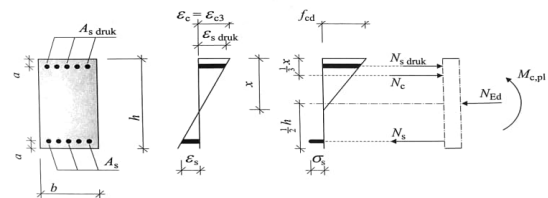
$$\epsilon_{s,druk} < \epsilon_{sy}$$

$\Sigma H = 0$	2,90E-06
x_{stuit}	126,22 mm

ϵ_{c3}	1,750E-03	α_c	30,00 [N/mm ²]	$N_{c,stuit}$	1893 [kN]
$\epsilon_{s,druk,stuit}$	8,07E-04	$\alpha_{s,druk}$	161,44 [N/mm ²]	$N_{s,druk,stuit}$	325 [kN]
$\epsilon_{s,stuit}$	9,79E-03	α_s	435,00 [N/mm ²]	$N_{s,stuit}$	-1118 [kN]
			N_{Ed}		-1100 [kN]
			$\Sigma H = 0$		0 [kN]

Controle uitgangspunten

ϵ_c	=	ϵ_{c3}	Ok
α_c	=	f_{cd}	Ok
α_s	>	ϵ_{sy}	Wapening vloeit => vloeimoment treedt eerder op dan stuitmoment
$\epsilon_{s,druk}$	<	ϵ_{sy}	Drukwapening vloeit niet
Stuitmoment	$M_{c,st} =$	1323,40 [kNm]	
Kromming	$\kappa_{c,stuit} =$	1,39E-02 [m ⁻¹]	
Buigstijfheid	$EI_{c,st} =$	9,35E+04 [kNm ²]	



Bezijsmoment

Uitgangspunten

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu3} = 3,50E-03$$

$$\alpha_c = f_{cd} = 30$$

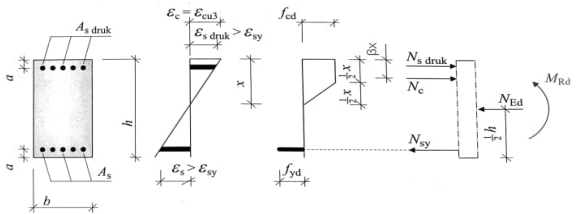
$$\epsilon_s > \epsilon_{sy}$$

$\Sigma H = 0$	4,41E-07
x_{bezijs}	85,67 mm

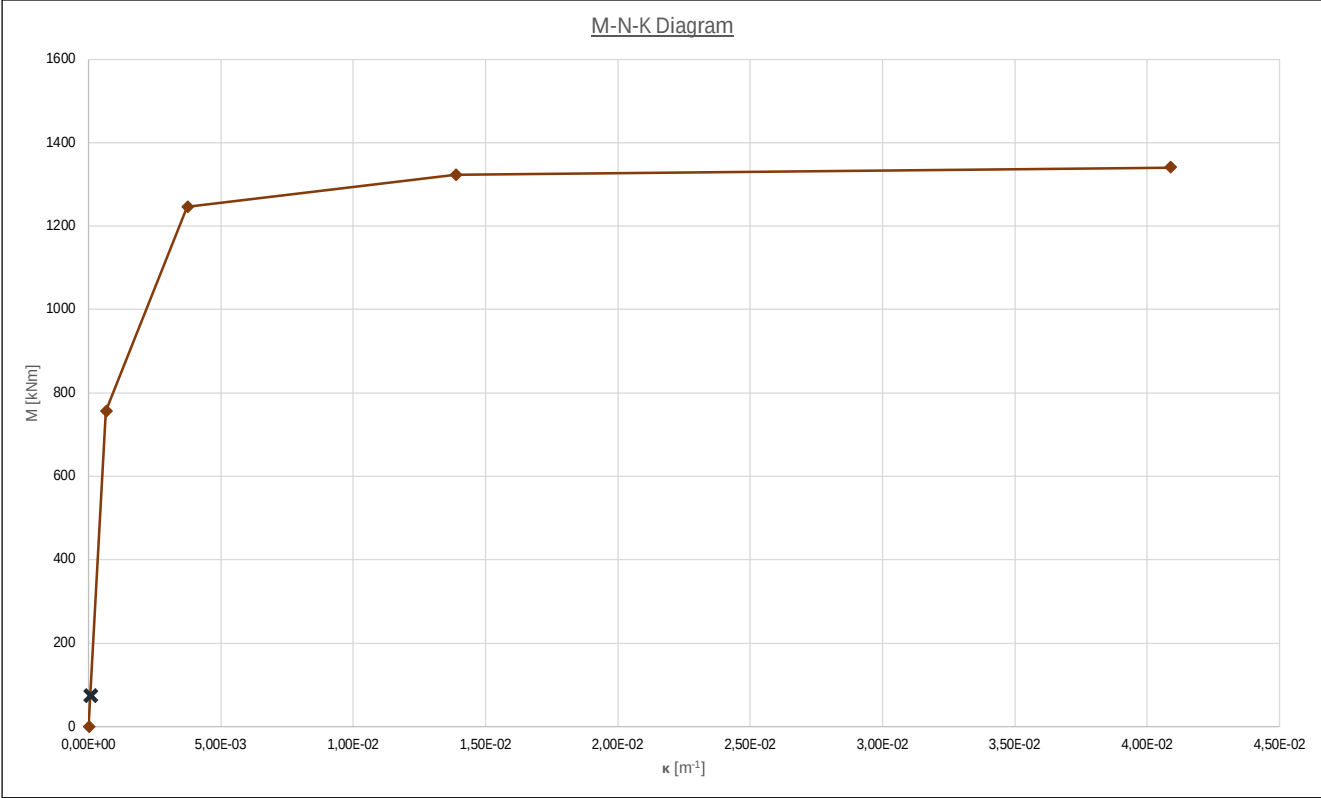
ϵ_c	3,500E-03	α_c	30,00 [N/mm ²]	$N_{c,bd}$	1928 [kN]
$\epsilon_{s,druk,vloei}$	7,22E-04	$\alpha_{s,druk}$	144,38 [N/mm ²]	$N_{s,druk,bd}$	290 [kN]
$\epsilon_{s,vloei}$	3,05E-02	α_s	435,00 [N/mm ²]	$N_{s,bd}$	-1118 [kN]
			N_{Ed}		-1100,00 [kN]
			$\Sigma H = 0$		0 [kN]

Controle uitgangspunten

ϵ_s	>	ϵ_{sy}	Ok, wapening vloeit
$\epsilon_{s,druk}$	X	ϵ_{sy}	Drukwapening vloeit niet
Bezijsmoment	$M_{Ed} =$	1341,17 [kNm]	
Kromming	$\kappa_{bd} =$	4,09E-02 [m ⁻¹]	
Buigstijfheid	$EI_{bd} =$	3,28E+04 [kNm ²]	



Overzicht				
Moment	Hoogte drukzone [mm]	Moment [kNm]	Kromming [m ⁻¹]	Buigstijfheid [kNm ²]
Scheurmoment	556,8	756	6,46E-04	1170563
Vloeimoment	247,3	1246	3,72E-03	335015
Stuikmoment	126,2	1323	1,39E-02	95451
Bezwijkmoment	85,7	1341	4,09E-02	32828



$M_{Ed} =$	75 [kNm]	
$K_{Ed} =$	6,40718E-05 [m ⁻¹]	
$I_y =$	60750000000 [mm ⁴]	$I_y = 1/12 \cdot b \cdot h^3$
$E =$	19269 [N/mm ²]	$E = M_{Ed} / K_{Ed} \cdot I_y$

M-N-K – Diagram meting 3

Omschrijving	Grootte	Eenheid
Breedte doorsnede	$b =$	1000 [mm]
Hoogte doorsnede	$h =$	900 [mm]
Dekking	$a =$	68 [mm]
Betondruksterkte	$f_{cd} =$	33,33 [N/mm ²]
Betontreksterkte	$f_{ctm} =$	4,07 [N/mm ²]
Rek betonsluit	$\epsilon_{c3} =$	1,75E-03 [-]
Grenswaarde rek	$\epsilon_{cu3} =$	3,50E-03 [-]
Oppervlaktefactor betondrukzone	$\alpha =$	0,75 [-]
Zwaartepunt betondrukzone	$\beta =$	0,39 [-]
Vloei grens wapening	$f_{yd} =$	435 [N/mm ²]
Rek vloei grens wapening	$\epsilon_{sy} =$	2,175E-03 [-]
Elasticiteitsmodulus beton	$E_c =$	19045,71 [N/mm ²]
Elasticiteitsmodulus wapening	$E_s =$	200000 [N/mm ²]
Rekenwaarde moment	$M_{Ed} =$	400 [kNm]
Rekenwaarde normaaldruk	$N_{Ed} =$	5500 [kN]
Drukwapening	$A_{s,druk} =$	2011 [mm ²]
Trekwapening	$A_{s,trek} =$	2570 [mm ²]

Bereken scheurmoment

Uitgangspunten

$$\epsilon_c < \epsilon_{c3} \Rightarrow \epsilon_{c,trek} = \alpha_c / E_c$$

$$\epsilon_{c,trek} = 2,14E-04$$

$$\alpha_c < f_{cd}$$

$$\alpha_c < f_{yd}$$

$$\Sigma H = 0 \quad -4,16E-04$$

$$x_{scheur} = 715,43 \text{ mm}$$

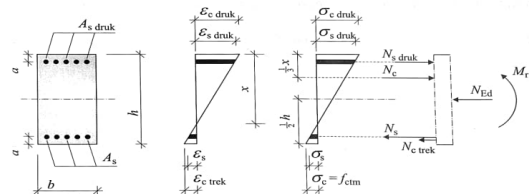
ϵ_c	8,283E-04	σ_c	15,78 [N/mm ²]	N_c	5643 [kN]
$\epsilon_{s,druk}$	7,50E-04	$\sigma_{s,druk}$	149,92 [N/mm ²]	$N_{s,druk}$	301 [kN]
ϵ_s	1,35E-04	σ_s	26,99 [N/mm ²]	N_s	-69 [kN]
$\epsilon_{c,trek}$	2,14E-04	$\sigma_{c,trek}$	4,07 [N/mm ²]	$N_{c,trek}$	-375,5 [kN]
				N_{Ed}	-5500 [kN]

$$\Sigma H = 0 \quad 0 \text{ [kN]}$$

Controle uitgangspunten

ϵ_c	<	ϵ_{c3}	Ok
σ_c	<	f_{cd}	Ok
σ_s	<	f_{yd}	Ok

Scheurmoment	$M_s =$	1481,30 [kNm]
Kromming	$\kappa_s =$	1,16E-03 [m ⁻¹]
Buigstijfheid	$EI_s =$	1,28E+06 [kNm ²]



Bereken vloei grens

Uitgangspunten

$$\epsilon_c < \epsilon_{c3}$$

$$\alpha_c < f_{cd}$$

$$\epsilon_c = f_{yd} / E_s = 2,18E-03$$

$$\alpha_{c,druk} < f_{yd}$$

$$\Sigma H = 0 \text{ als drukwap niet vloeit} \quad -1,21072E-08$$

$$x_{vloei} = 368,15 \text{ mm}$$

$$y = 0,0 \text{ mm}$$

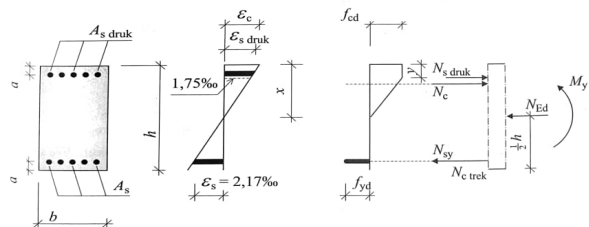
ϵ_c	1,726E-03	σ_c	32,88 [N/mm ²]	$N_{c,vloei}$	6052 [kN]
$\epsilon_{s,druk,vloei}$	1,41E-03	$\sigma_{s,druk}$	281,48 [N/mm ²]	$N_{s,druk,vloei}$	566 [kN]
$\epsilon_{s,vloei}$	2,18E-03	σ_s	435,00 [N/mm ²]	$N_{s,vloei}$	-1118 [kN]
				N_{Ed}	-5500,00 [kN]

$$\Sigma H = 0 \quad 0 \text{ [kN]}$$

Controle uitgangspunten

ϵ_c	<	ϵ_{c3}	Ok
σ_c	<	ϵ_{cu3}	Ok
σ_c	<	f_{cd}	Ok
ϵ_c	=	ϵ_{sy}	Ok, wapening vloeit
$\epsilon_{s,druk}$	<	ϵ_{sy}	Drukwapening vloeit niet

Vloeimoment	$M_{Ed} =$	2623,98 [kNm]
Kromming	$\kappa_{c,vloei} =$	4,69E-03 [m ⁻¹]
Buigstijfheid	$EI_{c,vl} =$	5,60E+05 [kNm ²]



Betonsluit

Uitgangspunten

$$\epsilon_c = \epsilon_{c3} = 1,75E-03$$

$$\alpha_c = f_{cd} = 33,33$$

$$\epsilon_{s,druk} < \epsilon_{sy}$$

$$\epsilon_{s,druk} < \epsilon_{sy}$$

$$\Sigma H = 0 \quad 0,00E+00$$

$$x_{s,sluit} = 362,80 \text{ mm}$$

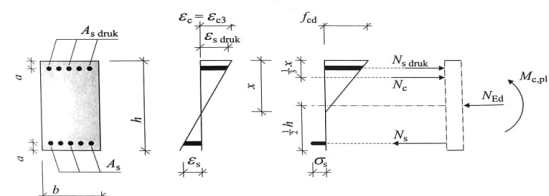
ϵ_{c3}	1,750E-03	σ_c	33,33 [N/mm ²]	$N_{c,sluit}$	6046 [kN]
$\epsilon_{s,druk,sluit}$	1,42E-03	$\sigma_{s,druk}$	284,40 [N/mm ²]	$N_{s,druk,sluit}$	572 [kN]
$\epsilon_{s,sluit}$	2,26E-03	σ_s	435,00 [N/mm ²]	$N_{s,sluit}$	-1118 [kN]
				N_{Ed}	-5500 [kN]

$$\Sigma H = 0 \quad 0 \text{ [kN]}$$

Controle uitgangspunten

ϵ_c	=	ϵ_{c3}	Ok
σ_c	=	f_{cd}	Ok
ϵ_c	>	ϵ_{sy}	Wapening vloeit => vloeimoment treedt eerder op dan sluitmoment
$\epsilon_{s,druk}$	<	ϵ_{sy}	Drukwapening vloeit niet

Sluitmoment	$M_{c,sl} =$	2635,08 [kNm]
Kromming	$\kappa_{c,sluit} =$	4,62E-03 [m ⁻¹]
Buigstijfheid	$EI_{c,sl} =$	5,46E+05 [kNm ²]



Bezijsmoment

Uitgangspunten

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu3} = 3,50E-03$$

$$\alpha_c = f_{cd} = 33,33$$

$$\epsilon_c > \epsilon_{sy}$$

$$\Sigma H = 0 \quad 0,00E+00$$

$$x_{bezijs} = 229,75 \text{ mm}$$

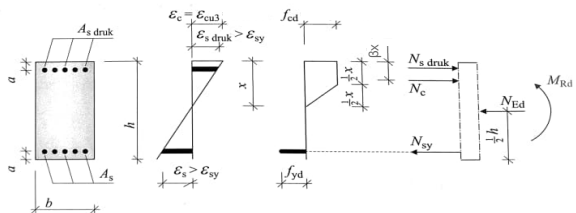
ϵ_c	3,500E-03	σ_c	33,33 [N/mm ²]	$N_{c,bezijs}$	5743 [kN]
$\epsilon_{s,druk,vloei}$	2,46E-03	$\sigma_{s,druk}$	435,00 [N/mm ²]	$N_{s,druk,bezijs}$	875 [kN]
$\epsilon_{s,vloei}$	9,17E-03	σ_s	435,00 [N/mm ²]	$N_{s,bezijs}$	-1118 [kN]
				N_{Ed}	-5500,00 [kN]

$$\Sigma H = 0 \quad 0 \text{ [kN]}$$

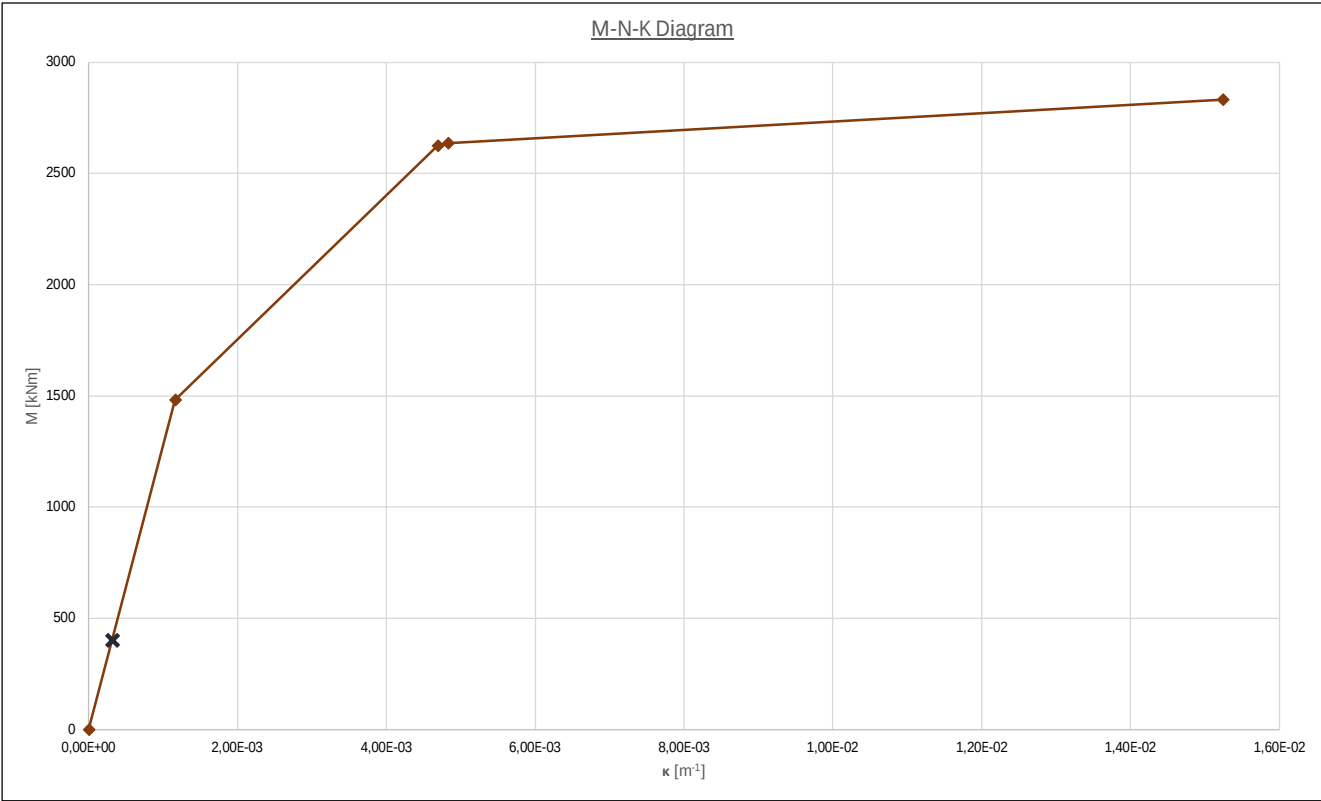
Controle uitgangspunten

ϵ_c	>	ϵ_{sy}	Ok, wapening vloeit
$\epsilon_{s,druk}$	>	ϵ_{sy}	Drukwapening vloeit niet

Bezijsmoment	$M_{Ed} =$	2832,51 [kNm]
Kromming	$\kappa_{bezijs} =$	1,62E-02 [m ⁻¹]
Buigstijfheid	$EI_{bezijs} =$	1,86E+05 [kNm ²]



Overzicht				
Moment	Hoogte drukzone [mm]	Moment [kNm]	Kromming [m ⁻¹]	Buigstijfheid [kNm ²]
Scheurmoment	715,4	1481	1,16E-03	1279387
Vloeimoment	368,1	2624	4,69E-03	559604
Stuikmoment	362,8	2635	4,82E-03	546287
Bezwijkmoment	229,7	2833	1,52E-02	185934



M _{Ed} =	400 [kNm]	
K _{Ed} =	0,00031265 [m ⁻¹]	
I _y =	60750000000 [mm ⁴]	I _y = 1/12*b*h ³
E =	21060 [N/mm ²]	E=M _{Ed} /K _{Ed} *I _y

M-N-K – Diagram meting 4

Omschrijving	Grootte	Eenheid
Breedte doorsnede	$b =$	1000 [mm]
Hoogte doorsnede	$h =$	900 [mm]
Dekking	$a =$	68 [mm]
Betondruksterkte	$f_{cd} =$	36,67 [N/mm ²]
Betontreksterkte	$f_{ctm} =$	4,21 [N/mm ²]
Rek betonsluit	$\epsilon_{c3} =$	1,80E-03 [-]
Grenswaarde rek	$\epsilon_{cu3} =$	3,10E-03 [-]
Oppervlaktefactor betondrukzone	$\alpha =$	0,73 [-]
Zwaartepunt betondrukzone	$\beta =$	0,37 [-]
Vloei-grenswaarde wapening	$f_{yd} =$	435 [N/mm ²]
Rek vloei-grenswaarde wapening	$\epsilon_{sy} =$	2,175E-03 [-]
Elasticiteitsmodulus beton	$E_c =$	20372,22 [N/mm ²]
Elasticiteitsmodulus wapening	$E_s =$	200000 [N/mm ²]
Rekenwaarde moment	$M_{Ed} =$	1433 [kNm]
Rekenwaarde normaaldruk	$N_{Ed} =$	5500 [kN]
Drukwapening	$A_{s,druk} =$	2011 [mm ²]
Trekwapening	$A_{s,trek} =$	2570 [mm ²]

Bereken scheurmoment

Uitgangspunten

$$\epsilon_c < \epsilon_{c3} \Rightarrow \epsilon_{c,trek} = \alpha_c / E_c$$

$$\epsilon_{c,trek} = 2,07E-04$$

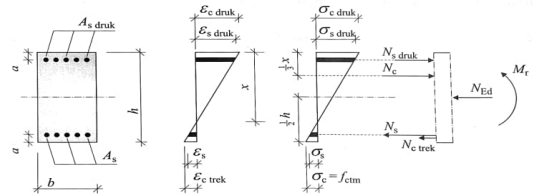
$$\alpha_c < f_{cd}$$

$$\alpha_c < f_{yd}$$

$$\Sigma H = 0 \Rightarrow x_{scheur} = 712,05 \text{ mm}$$

ϵ_c	7,829E-04	α_c	15,95 [N/mm ²]	N_c	5679 [kN]
$\epsilon_{s,druk}$	7,08E-04	$\alpha_{s,druk}$	141,63 [N/mm ²]	$N_{s,druk}$	285 [kN]
ϵ_s	1,32E-04	α_s	26,38 [N/mm ²]	$N_{s,trek}$	-68 [kN]
$\epsilon_{c,trek}$	2,07E-04	$\alpha_{c,trek}$	4,21 [N/mm ²]	$N_{c,trek}$	-395,6 [kN]
				N_{Ed}	-5500 [kN]

$$\Sigma H = 0 \Rightarrow 0 \text{ [kN]}$$



Controle uitgangspunten

ϵ_c	<	ϵ_{c3}	Ok
α_c	<	f_{cd}	Ok
α_s	<	f_{yd}	Ok
Scheurmoment	$M_r =$	1495,49 [kNm]	
Kromming	$\kappa_r =$	1,10E-03 [m ⁻¹]	
Buigstijfheid	$EI_b =$	1,36E+06 [kNm ²]	

Bereken vloei-grenswaarde

Uitgangspunten

$$\epsilon_c < \epsilon_{c3}$$

$$\alpha_c < f_{cd}$$

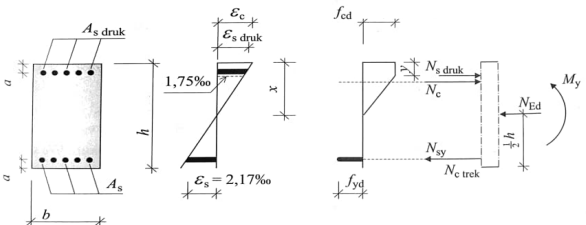
$$\epsilon_s = f_{yd} / E_s = 2,18E-03$$

$$\alpha_{s,druk} < f_{yd}$$

$$\Sigma H = 0 \text{ als drukwap niet vloei} \Rightarrow x_{vloei} = 359,87 \text{ mm}$$

ϵ_c	1,658E-03	α_c	33,77 [N/mm ²]	$N_{c,vloei}$	6077 [kN]
$\epsilon_{s,druk,vloei}$	1,34E-03	$\alpha_{s,druk}$	268,92 [N/mm ²]	$N_{s,druk,vloei}$	541 [kN]
$\epsilon_{s,vloei}$	2,18E-03	α_s	435,00 [N/mm ²]	$N_{s,vloei}$	-1118 [kN]
				N_{Ed}	-5500,00 [kN]

$$\Sigma H = 0 \Rightarrow 0 \text{ [kN]}$$



Controle uitgangspunten

ϵ_c	<	ϵ_{c3}	Ok
α_c	<	f_{cd}	Ok
α_s	<	f_{yd}	Ok
ϵ_s	=	ϵ_{sy}	Ok, wapening vloei
$\epsilon_{s,druk}$	<	ϵ_{sy}	Drukwapening vloei niet
Vloeimoment	$M_{Ed} =$	2639,36 [kNm]	
Kromming	$\kappa_{c,vloei} =$	4,61E-03 [m ⁻¹]	
Buigstijfheid	$EI_{c,vl} =$	5,73E+05 [kNm ²]	

Betonsluit

Uitgangspunten

$$\epsilon_c = \epsilon_{c3} = 1,80E-03$$

$$\alpha_c = f_{cd} = 36,67$$

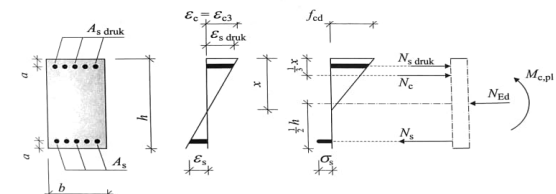
$$\epsilon_{s3} > \epsilon_{sy}$$

$$\epsilon_{s,druk} < \epsilon_{sy}$$

$$\Sigma H = 0 \Rightarrow x_{stuk} = 329,61 \text{ mm}$$

ϵ_{c3}	1,800E-03	α_c	36,67 [N/mm ²]	$N_{c,stuk}$	6043 [kN]
$\epsilon_{s,druk,stuk}$	1,43E-03	$\alpha_{s,druk}$	285,73 [N/mm ²]	$N_{s,druk,stuk}$	575 [kN]
$\epsilon_{s,stuk}$	2,74E-03	α_s	435,00 [N/mm ²]	$N_{s,stuk}$	-1118 [kN]
				N_{Ed}	-5500 [kN]

$$\Sigma H = 0 \Rightarrow 0 \text{ [kN]}$$



Controle uitgangspunten

ϵ_c	=	ϵ_{c3}	Ok
α_c	=	f_{cd}	Ok
ϵ_s	>	ϵ_{sy}	Wapening vloei => vloeimoment treedt eerder op dan stukmoment
$\epsilon_{s,druk}$	<	ϵ_{sy}	Drukwapening vloei niet
Stukmoment	$M_{c,pl} =$	2702,08 [kNm]	
Kromming	$\kappa_{c,stuk} =$	5,46E-03 [m ⁻¹]	
Buigstijfheid	$EI_{c,pl} =$	4,95E+05 [kNm ²]	

Bezijsmoment

Uitgangspunten

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu3} = 3,10E-03$$

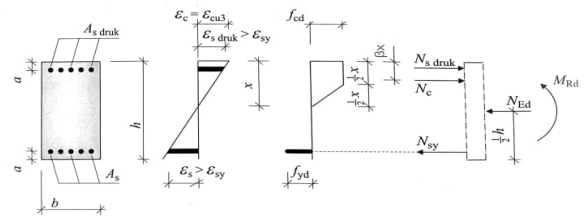
$$\alpha_c = f_{cd} = 36,67$$

$$\epsilon_s > \epsilon_{sy}$$

$$\Sigma H = 0 \Rightarrow x_{bezijs} = 221,03 \text{ mm}$$

ϵ_c	3,100E-03	α_c	36,67 [N/mm ²]	$N_{c,bd}$	5755 [kN]
$\epsilon_{s,druk,vloei}$	2,15E-03	$\alpha_{s,druk}$	429,26 [N/mm ²]	$N_{s,druk,bd}$	863 [kN]
$\epsilon_{s,vloei}$	8,57E-03	α_s	435,00 [N/mm ²]	$N_{s,bd}$	-1118 [kN]
				N_{Ed}	-5500,00 [kN]

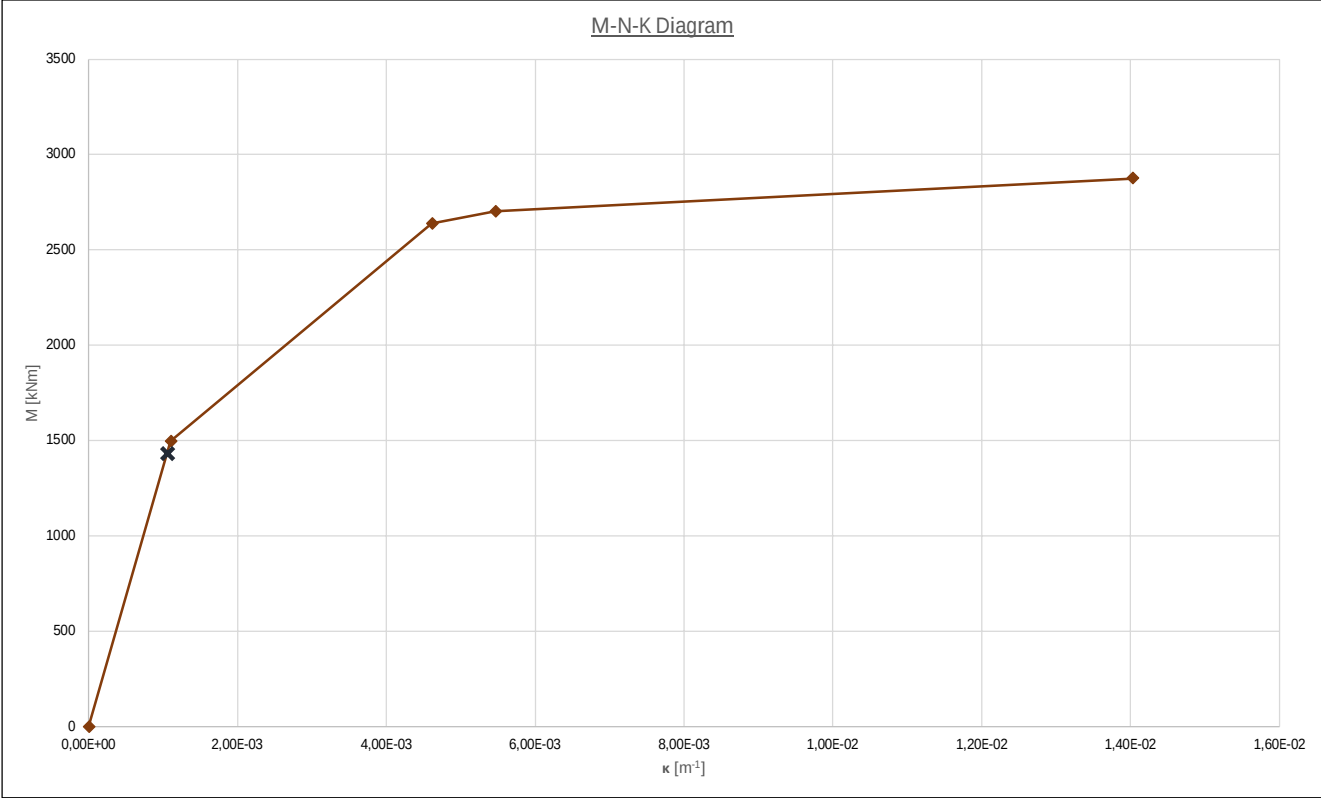
$$\Sigma H = 0 \Rightarrow 0 \text{ [kN]}$$



Controle uitgangspunten

ϵ_c	>	ϵ_{cu3}	Ok, wapening vloei
$\epsilon_{s,druk}$	X	ϵ_{sy}	Drukwapening vloei niet
Bezijsmoment	$M_{Ed} =$	2875,80 [kNm]	
Kromming	$\kappa_{bd} =$	1,40E-02 [m ⁻¹]	
Buigstijfheid	$EI_{bd} =$	2,05E+05 [kNm ²]	

Overzicht				
Moment	Hoogte drukzone [mm]	Moment [kNm]	Kromming [m ⁻¹]	Buigstijfheid [kNm ²]
Scheurmoment	712,1	1495	1,10E-03	1360116
Vloeimoment	359,9	2639	4,61E-03	572929
Stuikmoment	329,6	2702	5,46E-03	494792
Bezwijkmoment	221,0	2876	1,40E-02	205046



M _{Ed} =	1433 [kNm]	
K _{Ed} =	0,001053586 [m ⁻¹]	
I _y =	60750000000 [mm ⁴]	I _y = 1/12*b*h ³
E =	22389 [N/mm ²]	E=M _{Ed} /K _{Ed} *I _y

M-N-K-Diagram meting 5

Omschrijving	Grootte	Eenheid
Breedte doorsnede	$b =$	1000 [mm]
Hoogte doorsnede	$h =$	900 [mm]
Dekking	$a =$	68 [mm]
Betondruksterkte	$f_{cd} =$	40 [N/mm ²]
Betontreksterkte	$f_{ctm} =$	4,35 [N/mm ²]
Rek betonsluit	$\epsilon_{c3} =$	1,90E-03 [-]
Grenswaarde rek	$\epsilon_{cu3} =$	2,90E-03 [-]
Oppervlaktefactor betondrukzone	$\alpha =$	0,67 [-]
Zwaartepunt betondrukzone	$\beta =$	0,36 [-]
Vloei grens wapening	$f_{yd} =$	435 [N/mm ²]
Rek vloei grens wapening	$\epsilon_{sy} =$	2,175E-03 [-]
Elasticiteitsmodulus beton	$E_c =$	21052,63 [N/mm ²]
Elasticiteitsmodulus wapening	$E_s =$	200000 [N/mm ²]
		$E_c = f_{cd} / \epsilon_{c3}$
Rekenwaarde moment	$M_{Ed} =$	1053 [kNm]
Rekenwaarde normaaldruk	$N_{Ed} =$	5500 kN
Drukwapening	$A_{s,druk} =$	2011 [mm ²]
Trekwapening	$A_{s,trek} =$	2570 [mm ²]

Bereken scheurmoment

Uitgangspunten

$$\epsilon_c < \epsilon_{c3} \Rightarrow \epsilon_{c,trek} = \alpha_c / E_c$$

$$\epsilon_{c,trek} = 2,07E-04$$

$$\alpha_c < f_{cd}$$

$$\alpha_c < f_{yd}$$

$$\Sigma H = 0 \quad -6,38E-06$$

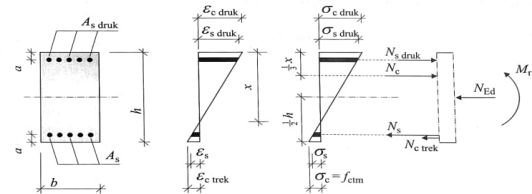
$$x_{scheur} = 708,62 \text{ mm}$$

ϵ_c	7,650E-04	α_c	16,11 [N/mm ²]	N_c	5707 [kN]
$\epsilon_{s,druk}$	6,92E-04	$\alpha_{s,druk}$	138,33 [N/mm ²]	$N_{s,druk}$	278 [kN]
ϵ_s	1,33E-04	α_s	26,64 [N/mm ²]	$N_{s,trek}$	-68 [kN]
$\epsilon_{c,trek}$	2,07E-04	$\alpha_{c,trek}$	4,35 [N/mm ²]	$N_{c,trek}$	-416,3 [kN]
				N_{Ed}	-5500 [kN]

$$\Sigma H = 0 \quad 0 \text{ [kN]}$$

Controle uitgangspunten

ϵ_c	<	ϵ_{c3}	Ok
α_c	<	f_{cd}	Ok
α_s	<	f_{yd}	Ok
Scheurmoment	$M_s =$	1513,21 [kNm]	
Kromming	$\kappa_s =$	1,08E-03 [m ⁻¹]	
Buigstijfheid	$EI_s =$	1,40E+06 [kNm ²]	



Bereken vloei grens

Uitgangspunten

$$\epsilon_c < \epsilon_{c3}$$

$$\alpha_c < f_{cd}$$

$$\epsilon_s = f_{yd} / E_s = 2,18E-03$$

$$\alpha_{s,druk} < f_{yd}$$

$$\Sigma H = 0 \text{ als drukwap niet vloei} \quad 4,44222E-05$$

$$x_{vloei} = 355,86 \text{ mm}$$

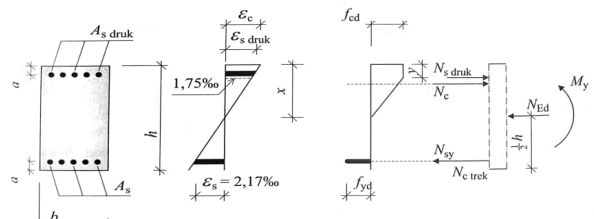
$$y = 0,0 \text{ mm}$$

ϵ_c	1,626E-03	α_c	34,22 [N/mm ²]	$N_{c,vloei}$	6089 [kN]
$\epsilon_{s,druk,vloei}$	1,31E-03	$\alpha_{s,druk}$	262,98 [N/mm ²]	$N_{s,druk,vloei}$	529 [kN]
$\epsilon_{s,vloei}$	2,18E-03	α_s	435,00 [N/mm ²]	$N_{s,vloei}$	-1118 [kN]
				N_{Ed}	-5500,00 [kN]

$$\Sigma H = 0 \quad 0 \text{ [kN]}$$

Controle uitgangspunten

ϵ_c	<	ϵ_{c3}	Ok
α_c	<	f_{cd}	Ok
α_s	<	f_{yd}	Ok
ϵ_s	=	ϵ_{sy}	Ok, wapening vloei
$\epsilon_{s,druk}$	<	ϵ_{sy}	Drukwapening vloei niet
Vloeimoment	$M_{Ed} =$	2646,89 [kNm]	
Kromming	$\kappa_{c,vloei} =$	4,57E-03 [m ⁻¹]	
Buigstijfheid	$EI_{c,vl} =$	5,79E+05 [kNm ²]	



Betonsluit

Uitgangspunten

$$\epsilon_c = \epsilon_{c3} = 1,90E-03$$

$$\alpha_c = f_{cd} = 40$$

$$\epsilon_{s3} > \epsilon_{sy}$$

$$\epsilon_{s,druk} < \epsilon_{sy}$$

$$\Sigma H = 0 \quad 2,22E-04$$

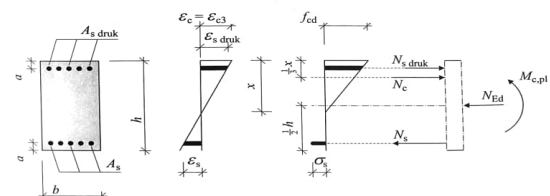
$$x_{stuit} = 301,31 \text{ mm}$$

ϵ_{c3}	1,900E-03	α_c	40,00 [N/mm ²]	$N_{c,stuit}$	6026 [kN]
$\epsilon_{s,druk,stuit}$	1,47E-03	$\alpha_{s,druk}$	294,24 [N/mm ²]	$N_{s,druk,stuit}$	592 [kN]
$\epsilon_{s,stuit}$	3,35E-03	α_s	435,00 [N/mm ²]	$N_{s,stuit}$	-1118 [kN]
				N_{Ed}	-5500 [kN]

$$\Sigma H = 0 \quad 0 \text{ [kN]}$$

Controle uitgangspunten

ϵ_c	=	ϵ_{c3}	Ok
α_c	=	f_{cd}	Ok
α_s	>	ϵ_{sy}	Wapening vloei => vloeimoment treedt eerder op dan stuitmoment
$\epsilon_{s,druk}$	<	ϵ_{sy}	Drukwapening vloei niet
Stuitmoment	$M_{c,st} =$	2759,64 [kNm]	
Kromming	$\kappa_{c,stuit} =$	6,31E-03 [m ⁻¹]	
Buigstijfheid	$EI_{c,st} =$	4,36E+05 [kNm ²]	



Bezijsmoment

Uitgangspunten

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu3} = 2,90E-03$$

$$\alpha_c = f_{cd} = 40$$

$$\epsilon_s > \epsilon_{sy}$$

$$\Sigma H = 0 \quad 1,30E-08$$

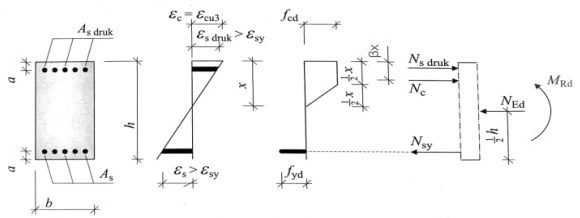
$$x_{bezijs} = 217,05 \text{ mm}$$

ϵ_c	2,900E-03	α_c	40,00 [N/mm ²]	$N_{c,bid}$	5817 [kN]
$\epsilon_{s,druk,vloei}$	1,99E-03	$\alpha_{s,druk}$	398,29 [N/mm ²]	$N_{s,druk,bid}$	801 [kN]
$\epsilon_{s,vloei}$	8,22E-03	α_s	435,00 [N/mm ²]	$N_{s,bid}$	-1118 [kN]
				N_{Ed}	-5500,00 [kN]

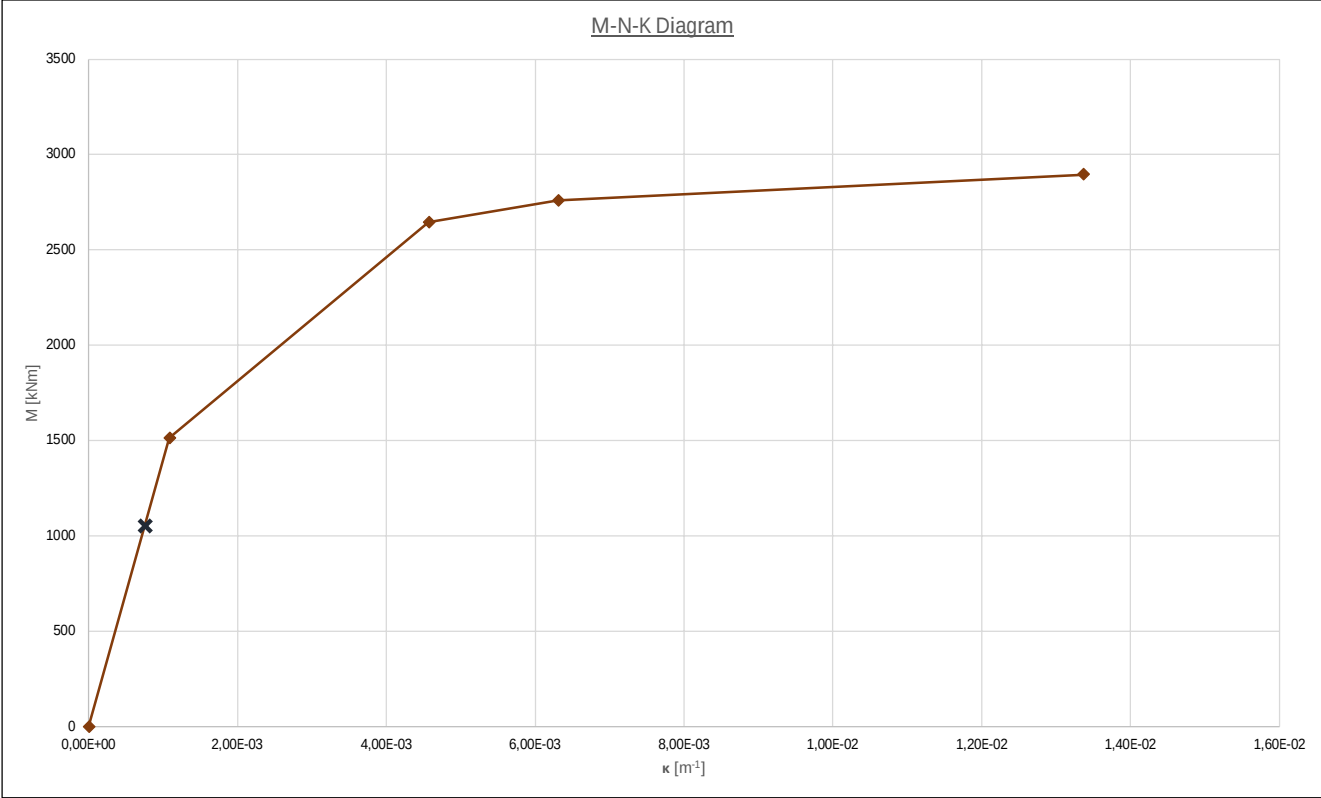
$$\Sigma H = 0 \quad 0 \text{ [kN]}$$

Controle uitgangspunten

ϵ_s	>	ϵ_{sy}	Ok, wapening vloei
$\epsilon_{s,druk}$	X	ϵ_{sy}	Drukwapening vloei niet
Bezijsmoment	$M_{Ed} =$	2896,14 [kNm]	
Kromming	$\kappa_{bid} =$	1,34E-02 [m ⁻¹]	
Buigstijfheid	$EI_{bid} =$	2,17E+05 [kNm ²]	



Overzicht				
Moment	Hoogte drukzone [mm]	Moment [kNm]	Kromming [m ⁻¹]	Buigstijfheid [kNm ²]
Scheurmoment	708,6	1513	1,08E-03	1401598
Vloeimoment	355,9	2647	4,57E-03	579446
Stuikmoment	301,3	2760	6,31E-03	437638
Bezwijkmoment	217,1	2896	1,34E-02	216763



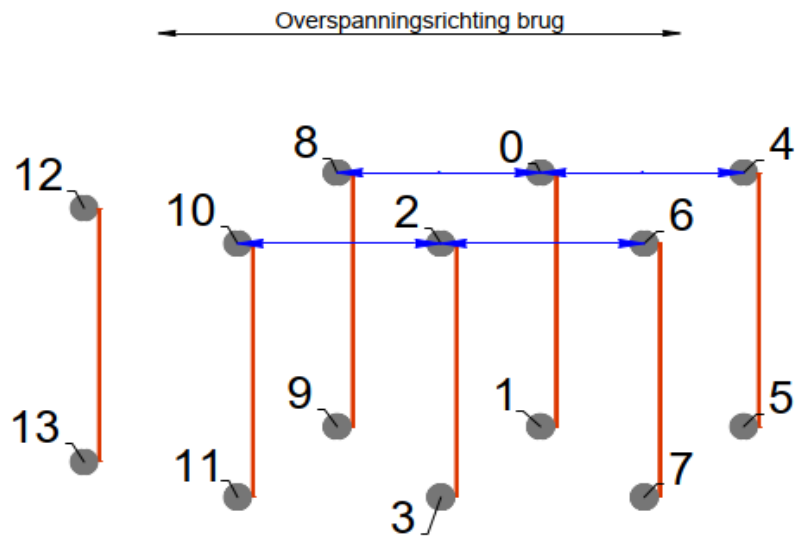
M _{Ed} =	1053 [kNm]	
K _{Ed} =	0,000751285 [m ⁻¹]	
I _y =	60750000000 [mm ⁴]	I _y = 1/12*b*h ³
E =	23072 [N/mm ²]	E=M _{Ed} /K _{Ed} *I _y

BIJLAGE H – CWI RESULTATEN MEETLOCATIE POS3

Bijlage H – CWI POS3

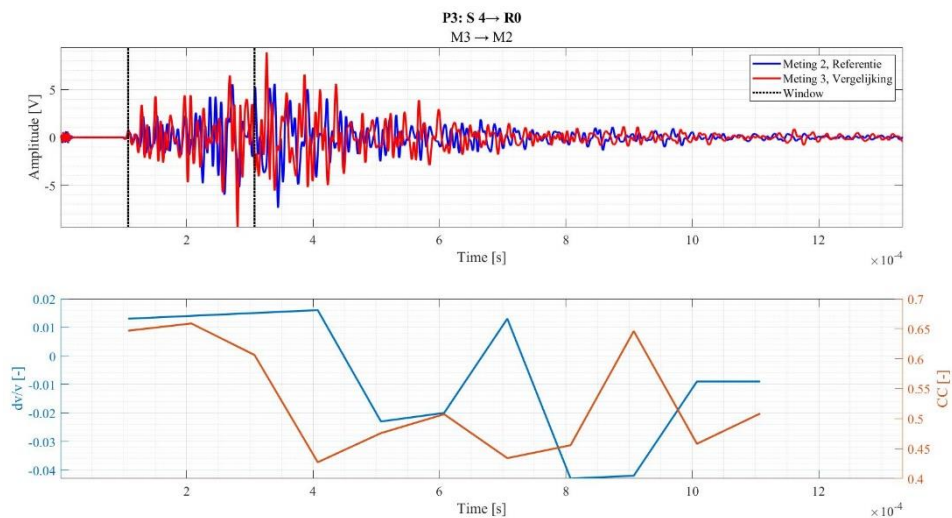
1	CWI POS3 – bovenzijde.....	2
1.1	Sensorpaar 4 – 0 v.v.	3
1.2	Sensorpaar 0 – 8 v.v.	9
1.3	Sensorpaar 6 – 2 v.v.	15
1.4	Sensorpaar 2 – 10 v.v.	21
2	CWI POS3 – onderzijde	27
2.1	Sensorpaar 5 – 1 v.v.	28
2.2	Sensorpaar 1 – 9 v.v.	34
2.3	Sensorpaar 7 – 3 v.v.	40
2.4	Sensorpaar 3 – 11 v.v.	46

1 CWI POS3 – BOVENZIJDE

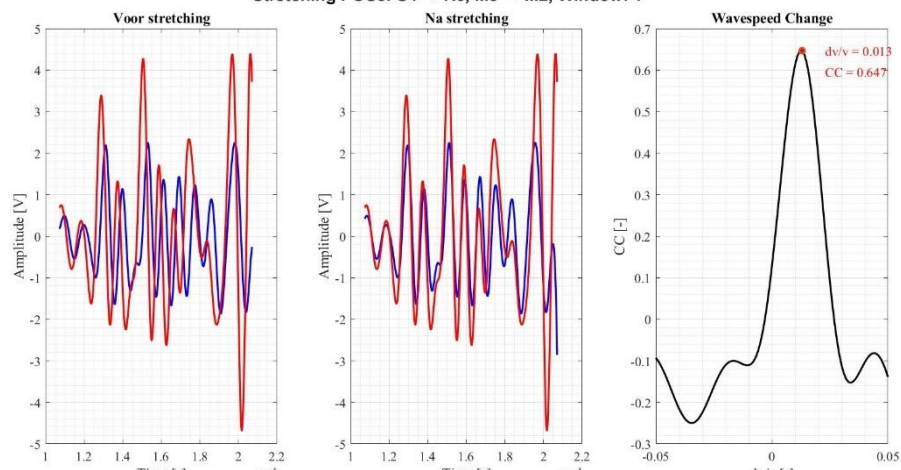


1.1 Sensorpaar 4 – 0 v.v.

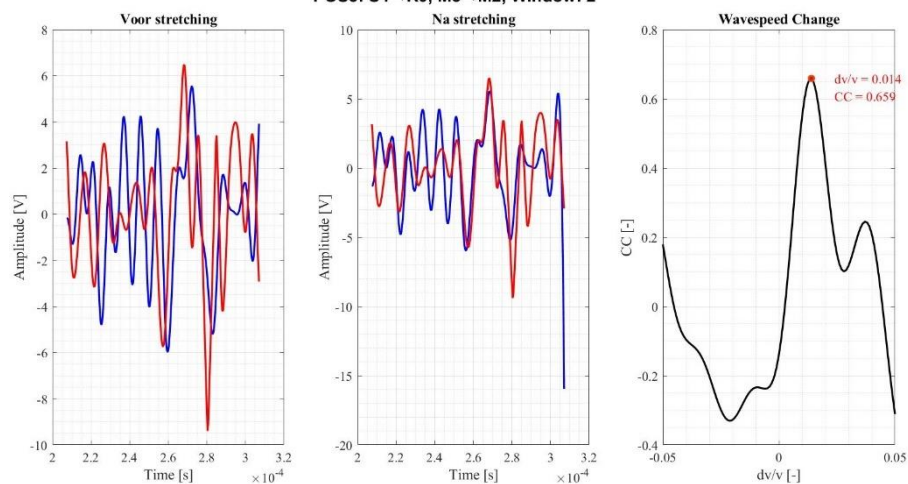
1.1.1 Sensorpaar 4-0, Meting 3->2



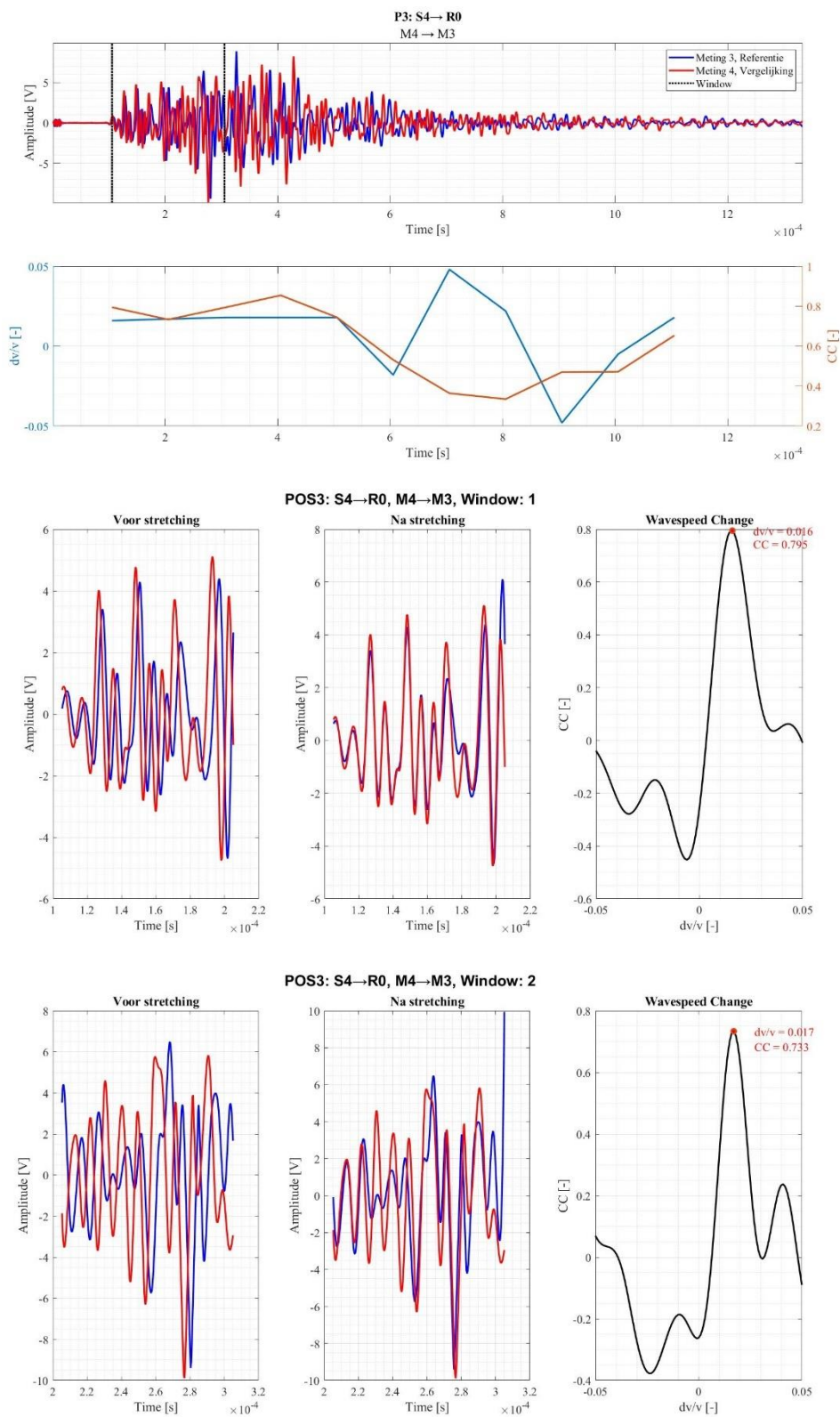
Stretching POS3: S4 → R0, M3 → M2, Window: 1



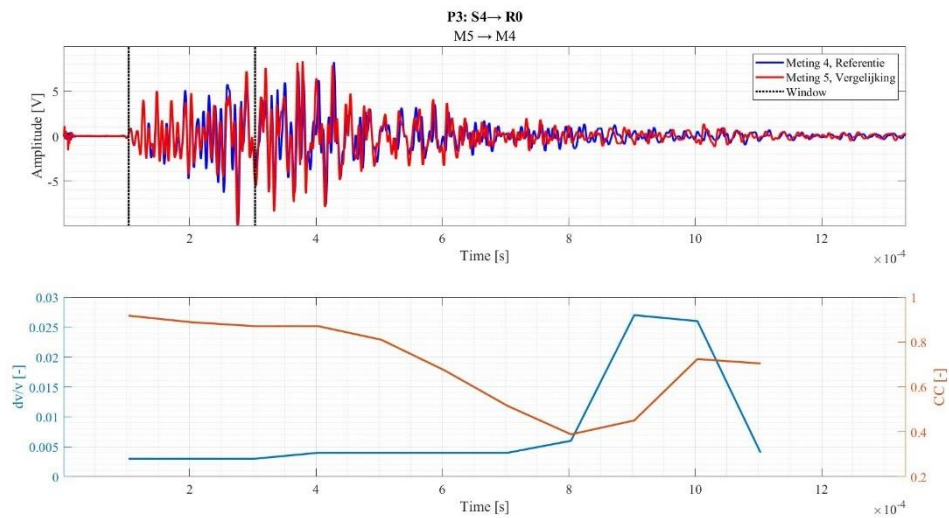
POS3: S4 → R0, M3 → M2, Window: 2



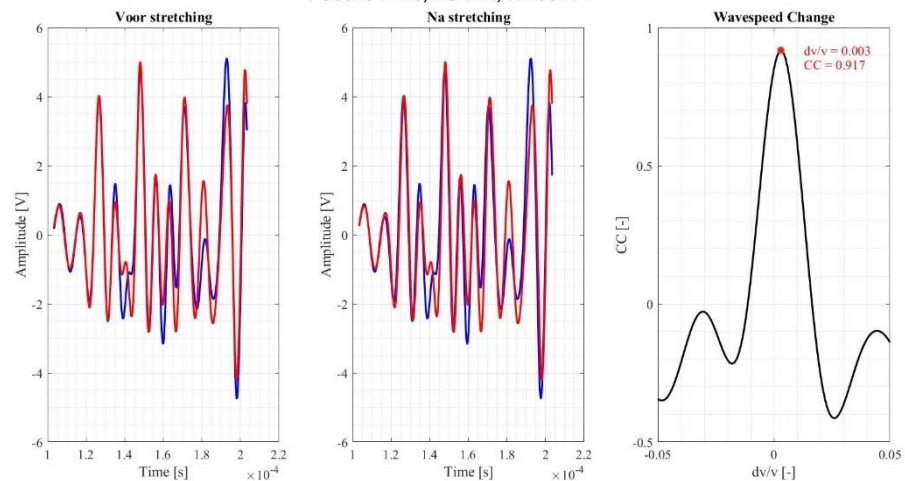
1.1.2 Sensorpaar 4-0, Meting 4->3



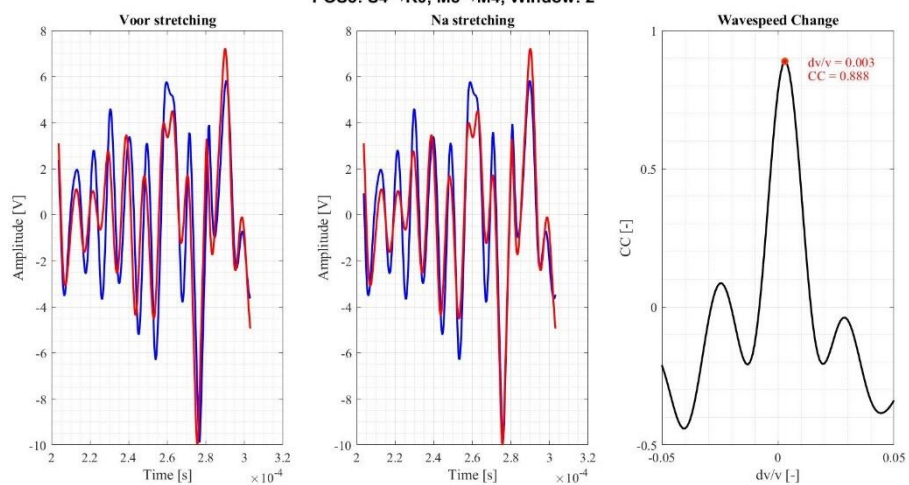
1.1.3 Sensorpaar 4-0, Meting 5->4



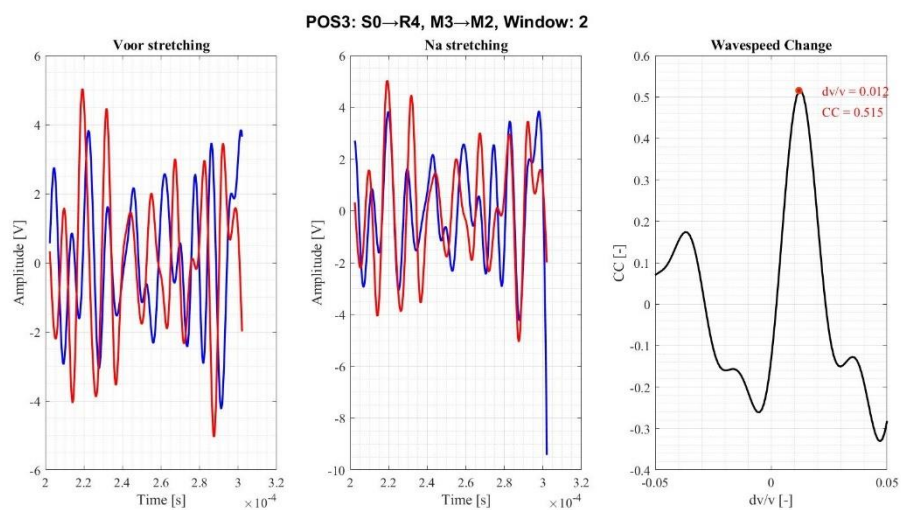
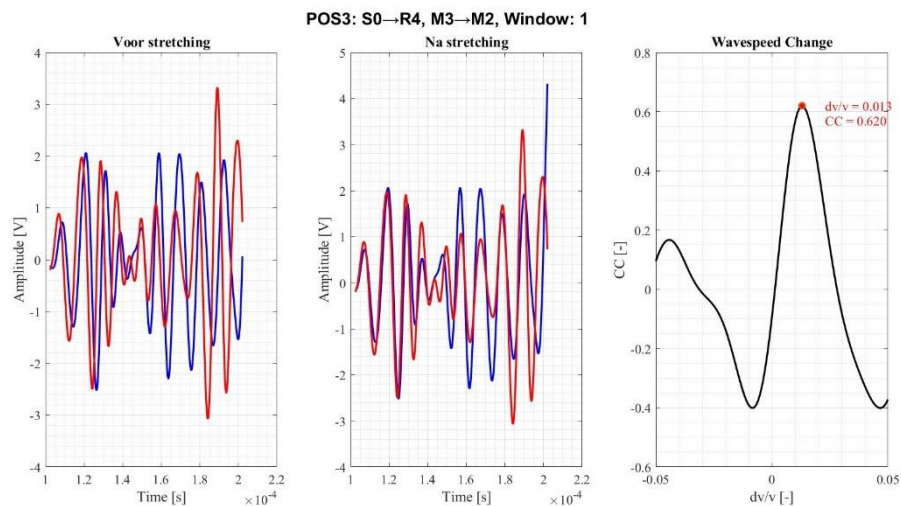
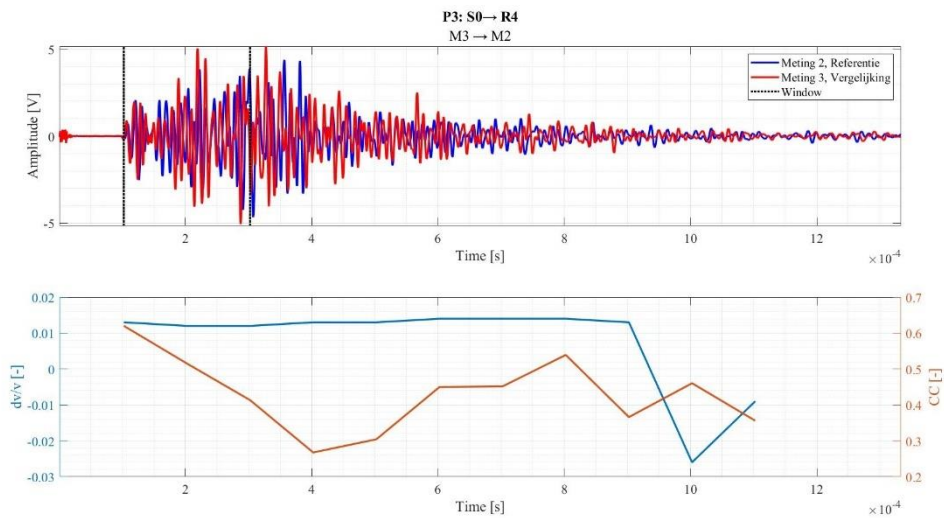
POS3: S4→R0, M5→M4, Window: 1



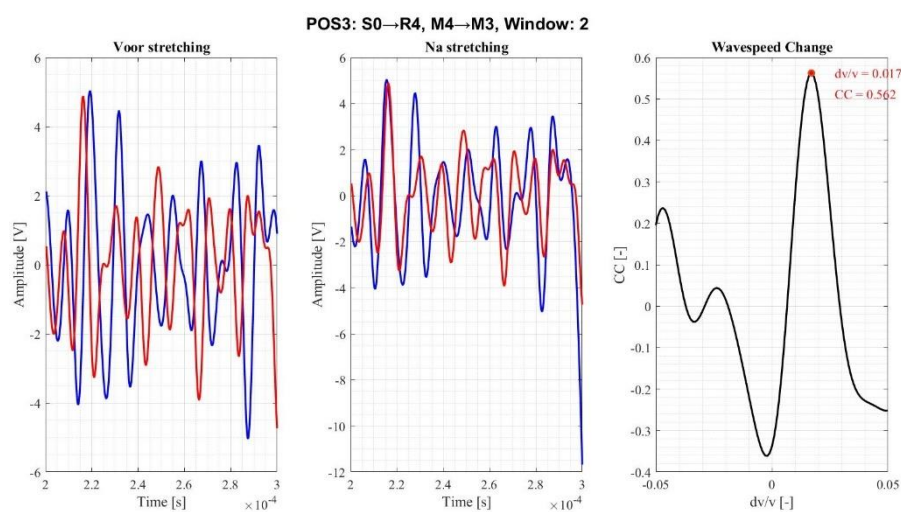
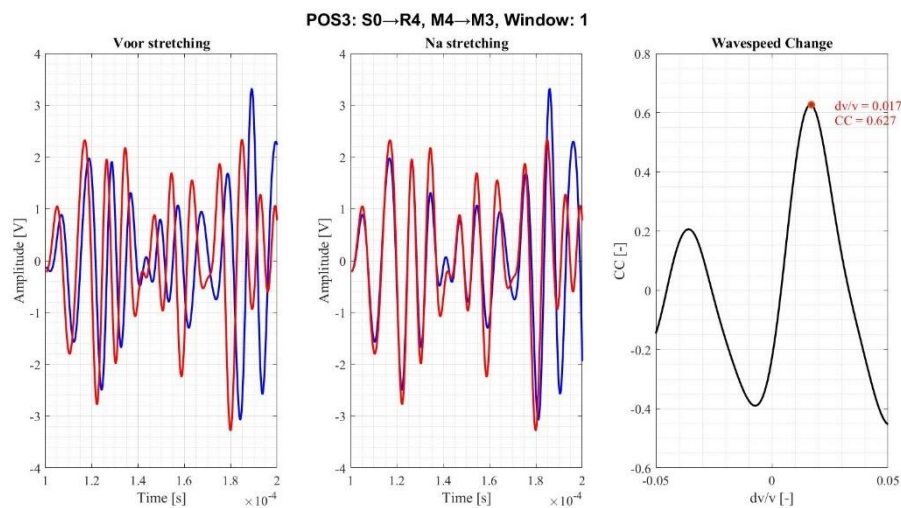
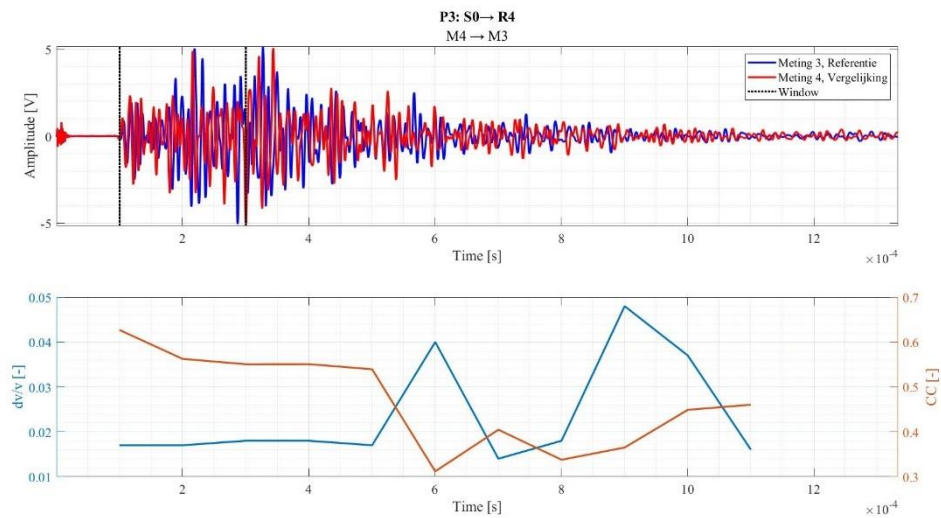
POS3: S4→R0, M5→M4, Window: 2



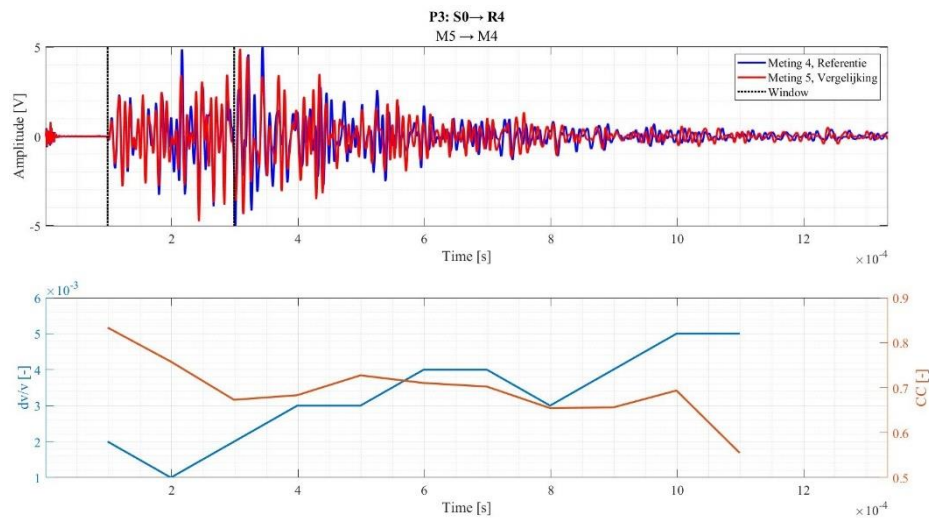
1.1.4 Sensorpaar 0-4, Meting 3->2



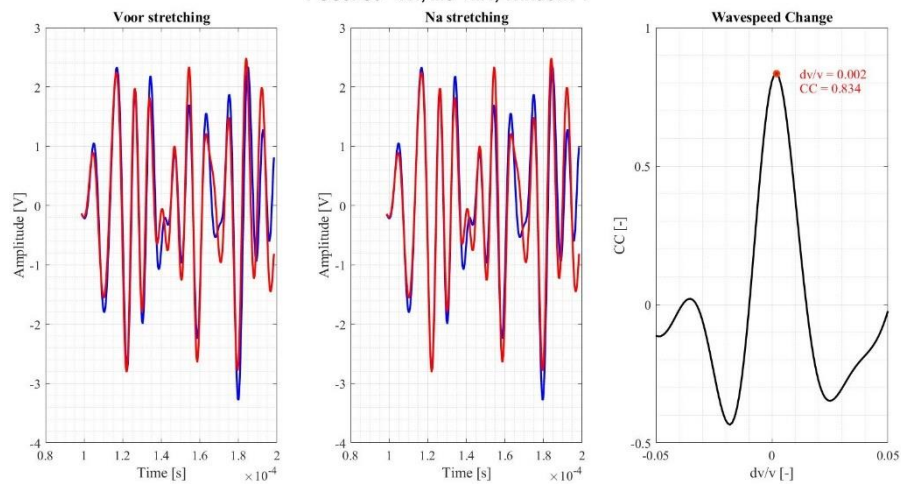
1.1.5 Sensorpaar 0-4, Meting 4->3



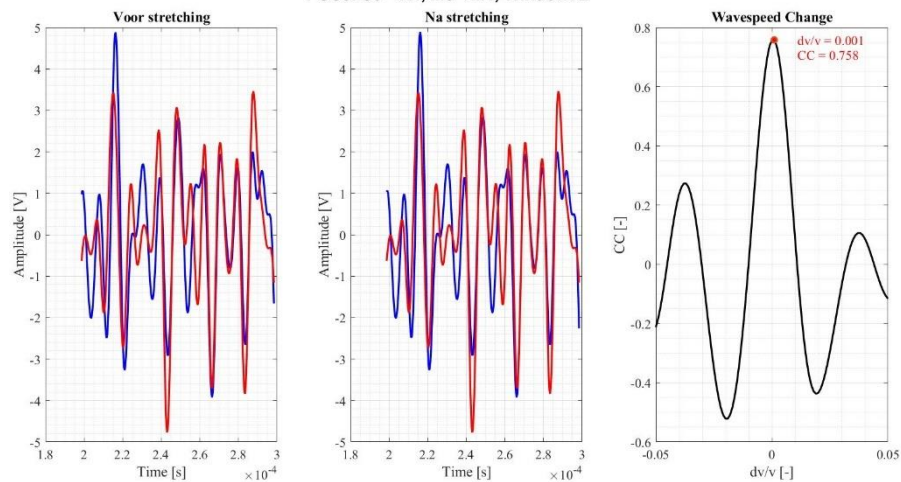
1.1.6 Sensorpaar 0-4, Meting 5->4



POS3: S0→R4, M5→M4, Window: 1

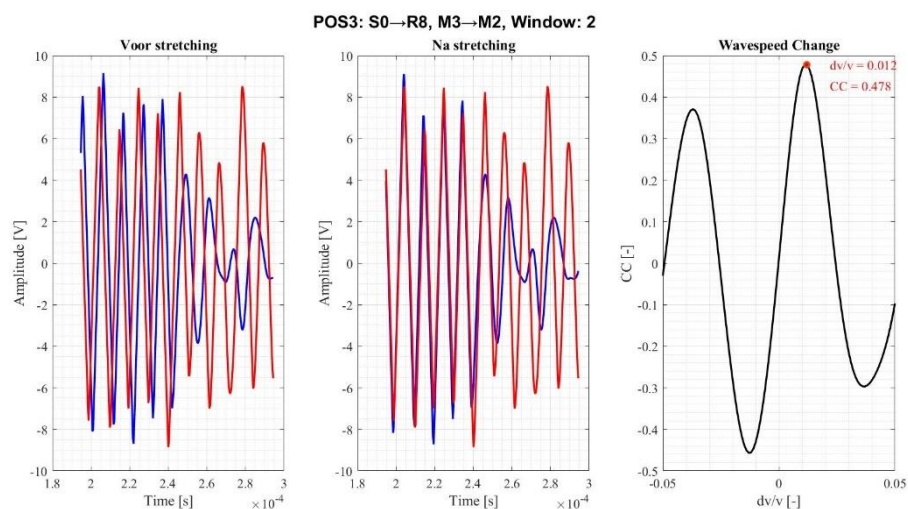
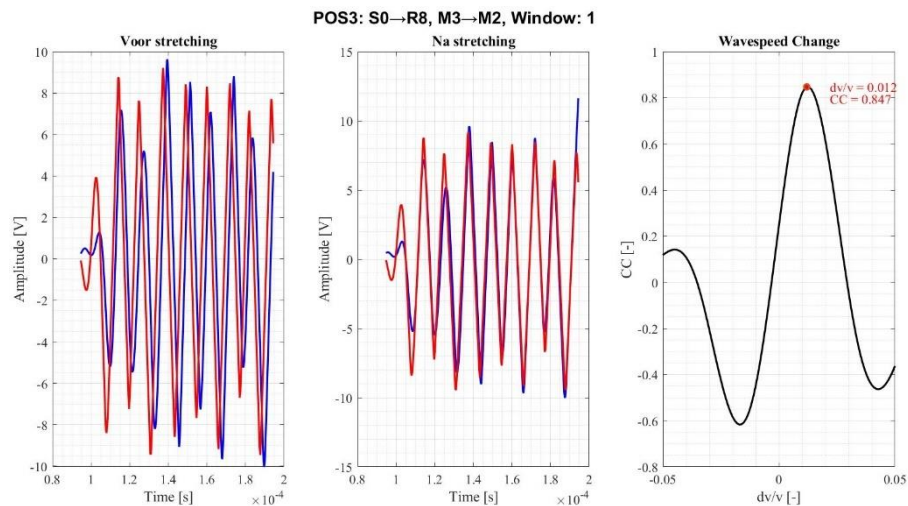
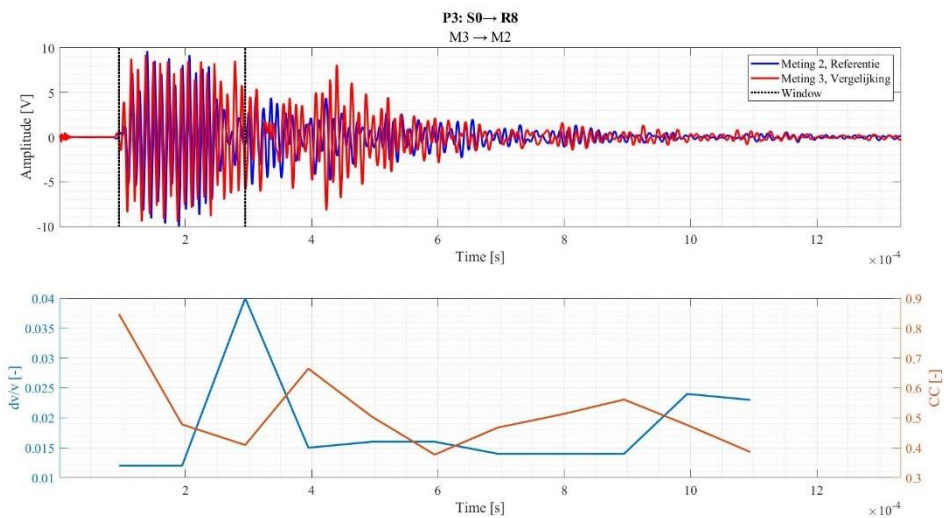


POS3: S0→R4, M5→M4, Window: 2

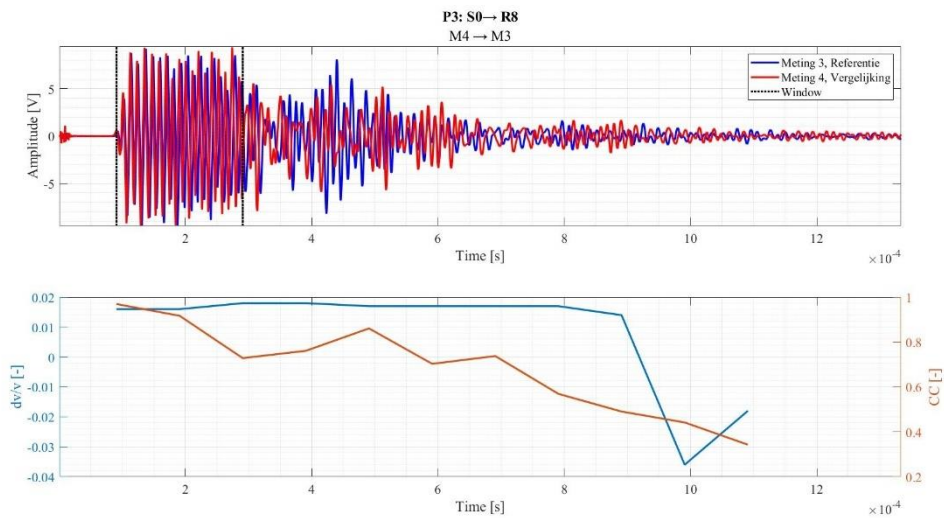


1.2 Sensorpaar 0 – 8 v.v.

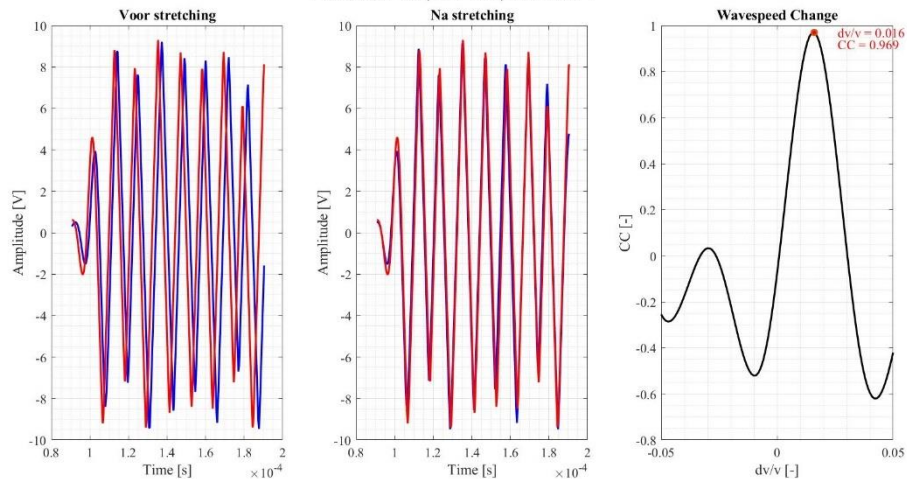
1.2.1 Sensorpaar 0-8, Meting 3->2



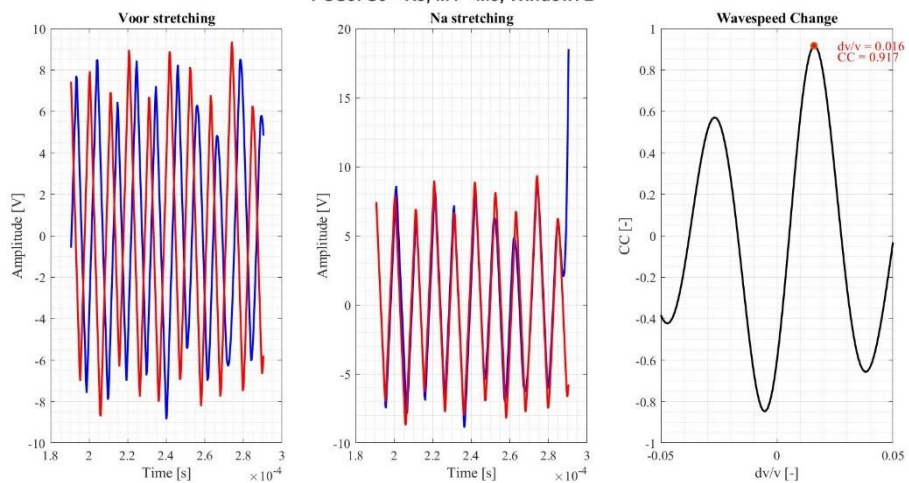
1.2.2 Sensorpaar 0-8, Meting 4->3



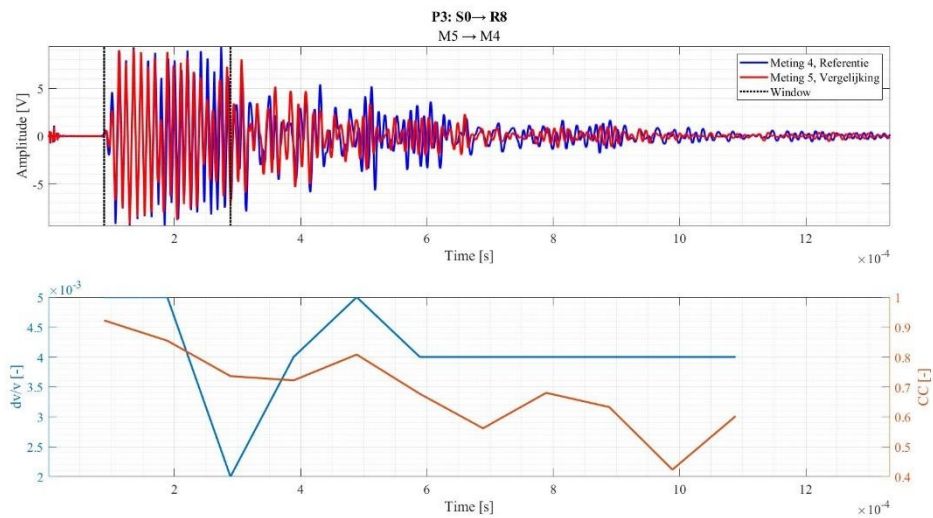
POS3: S0→R8, M4→M3, Window: 1



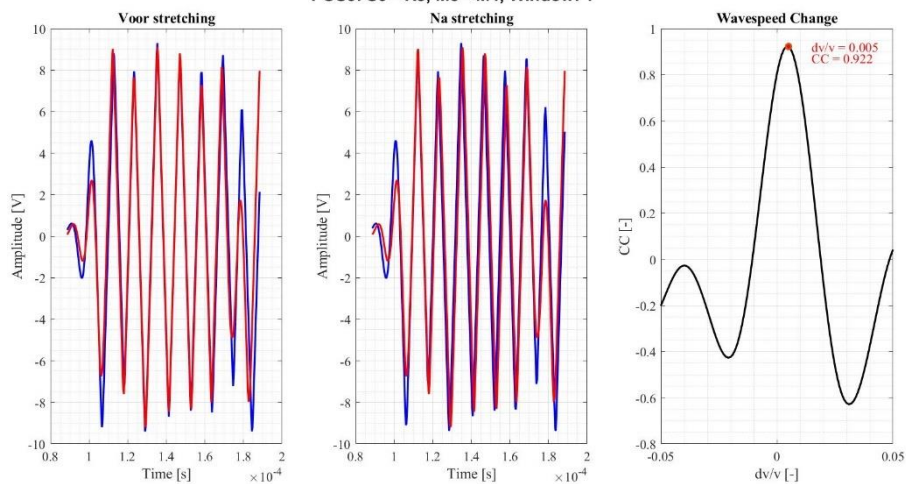
POS3: S0→R8, M4→M3, Window: 2



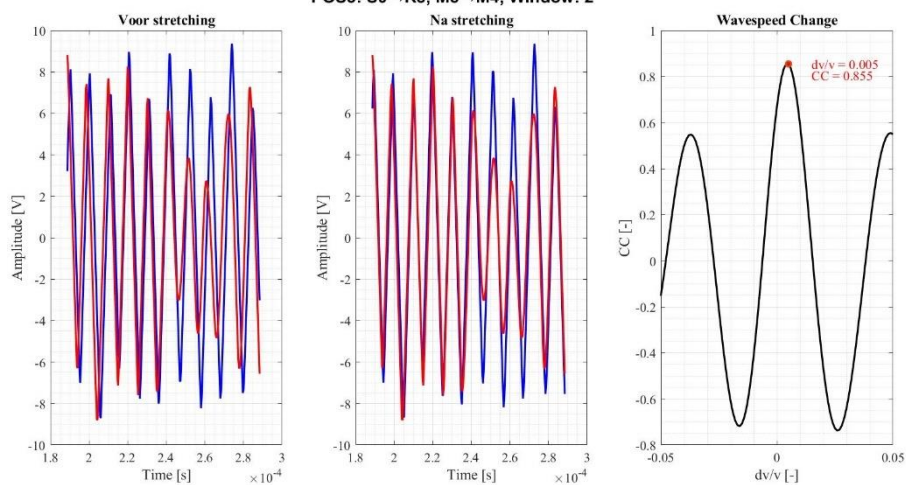
1.2.3 Sensorpaar 0-8, Meting 5->4



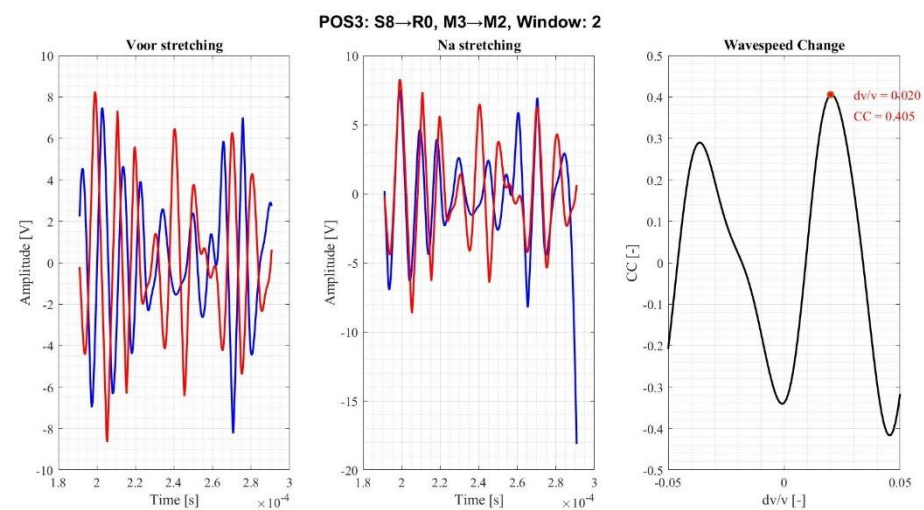
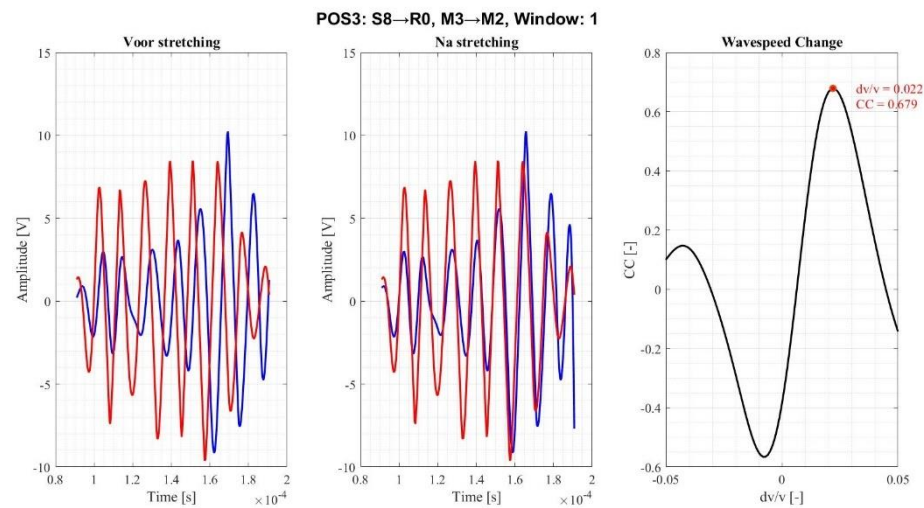
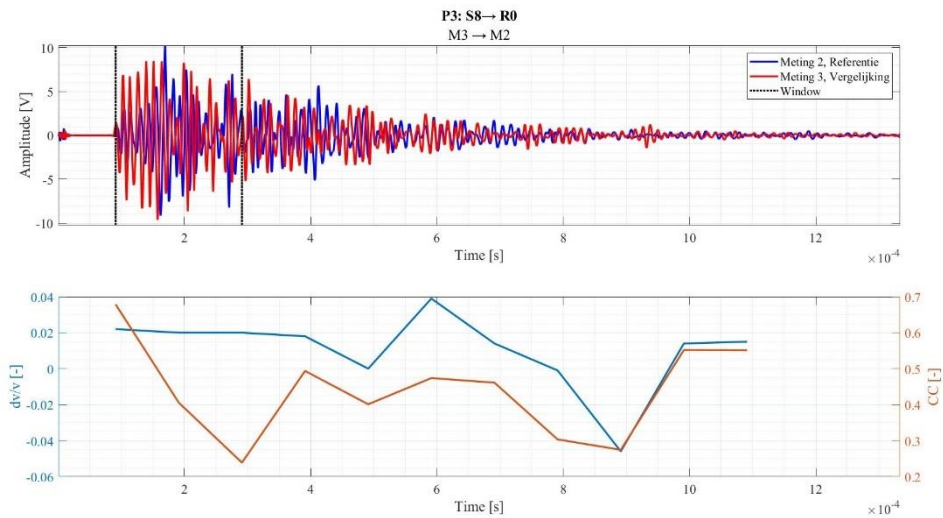
POS3: S0→R8, M5→M4, Window: 1



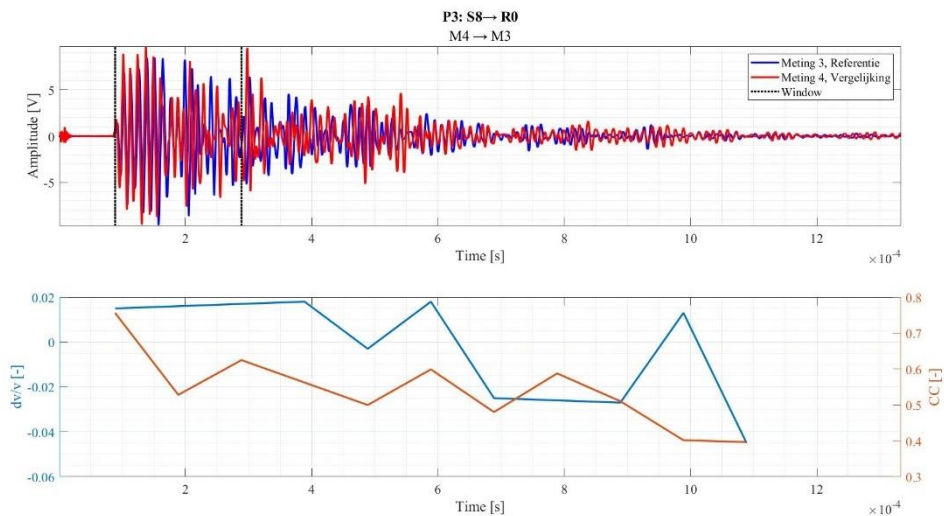
POS3: S0→R8, M5→M4, Window: 2



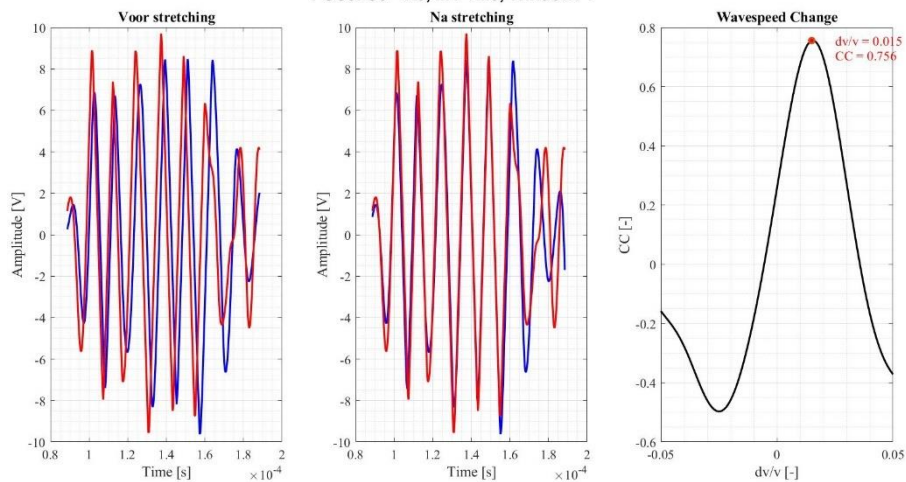
1.2.4 Sensorpaar 8-0, Meting 3->2



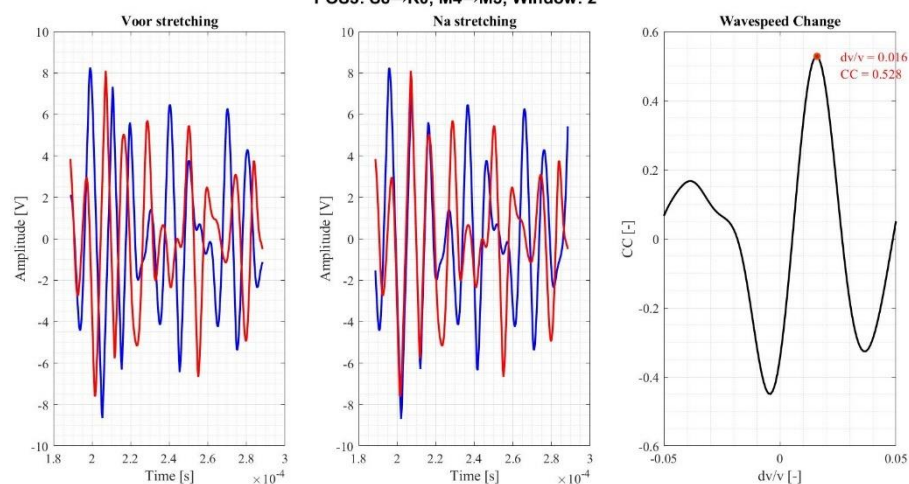
1.2.5 Sensorpaar 8-0, Meting 4->3



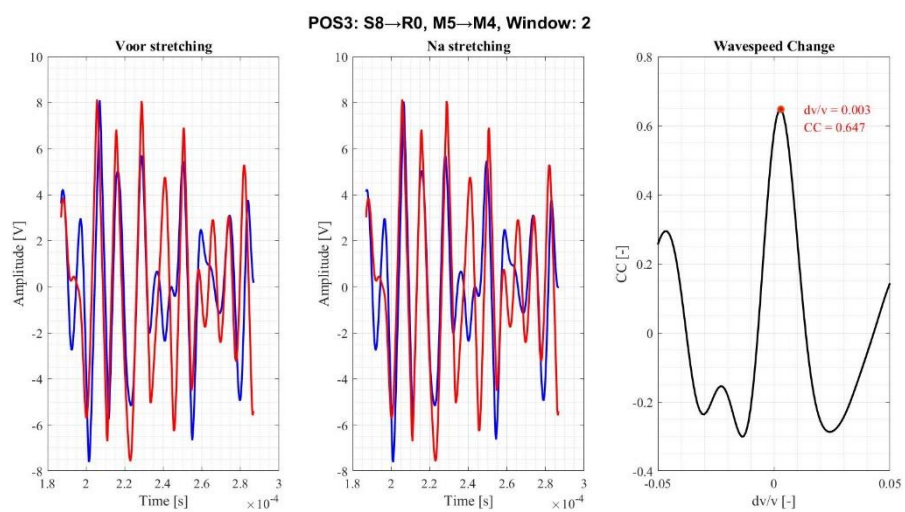
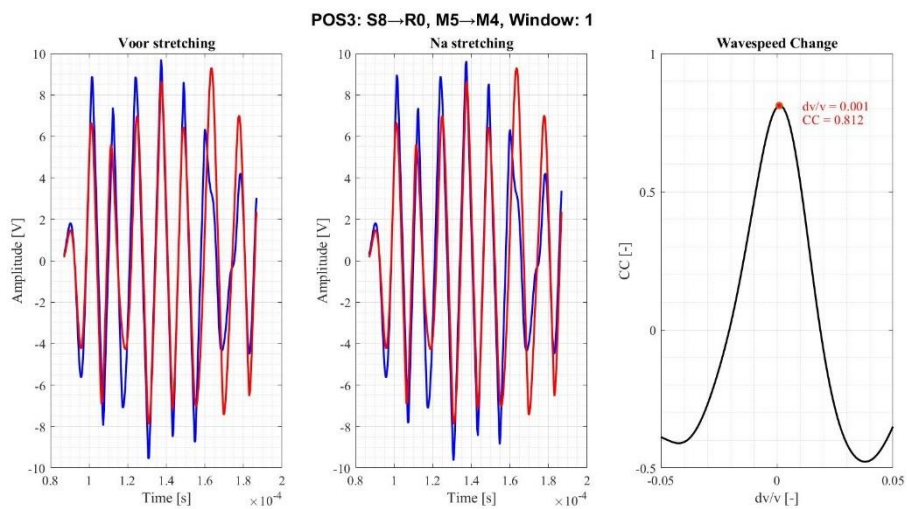
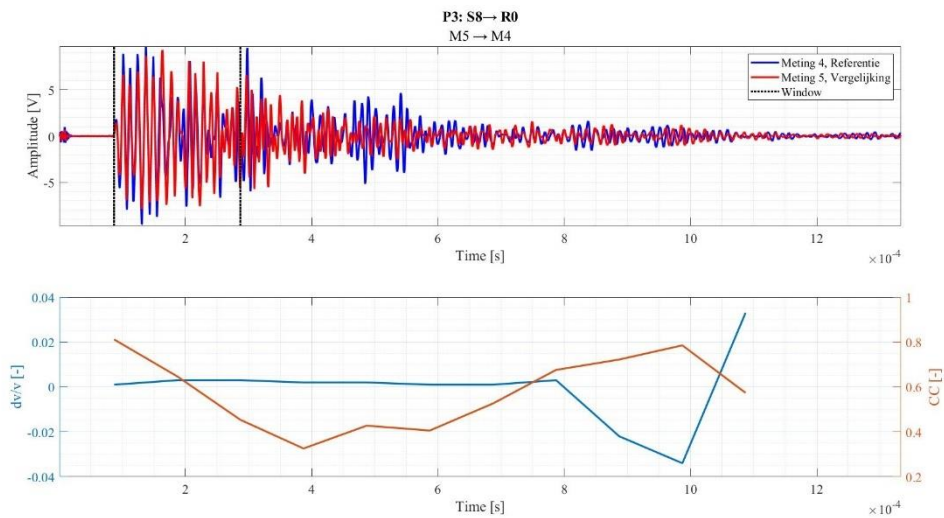
POS3: S8→R0, M4→M3, Window: 1



POS3: S8→R0, M4→M3, Window: 2

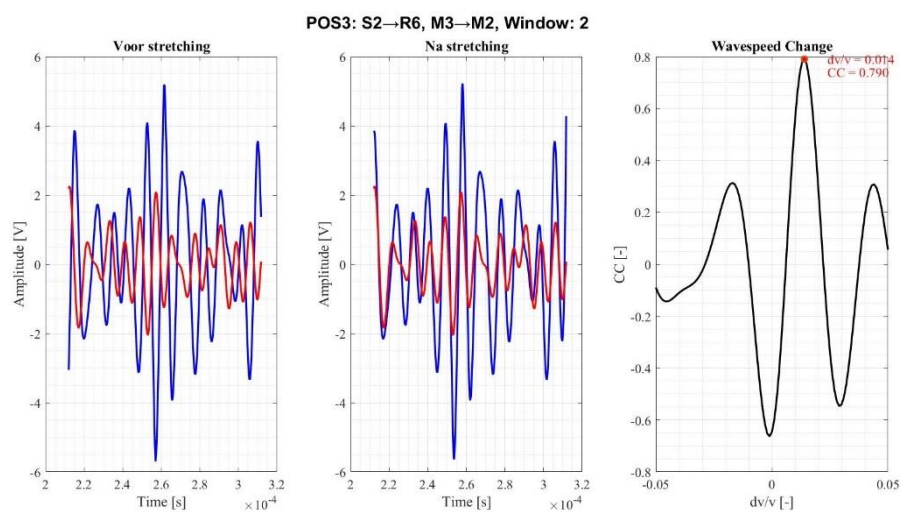
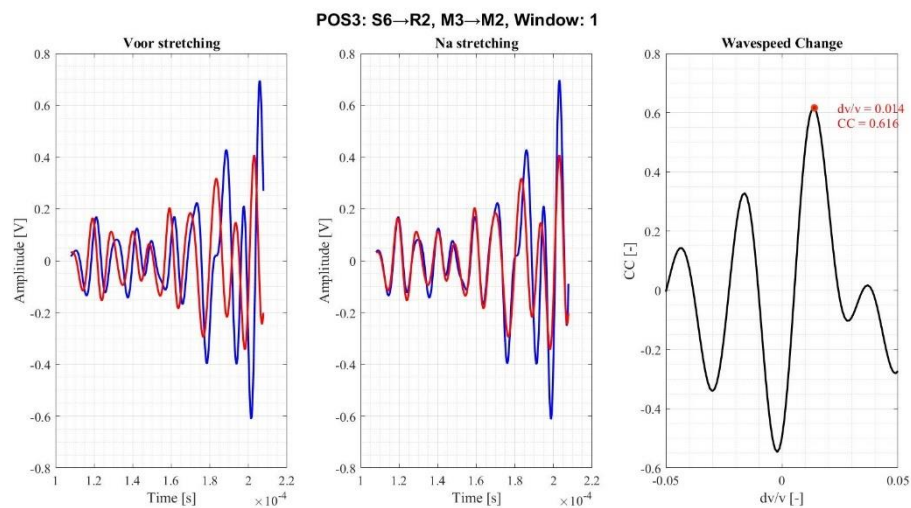
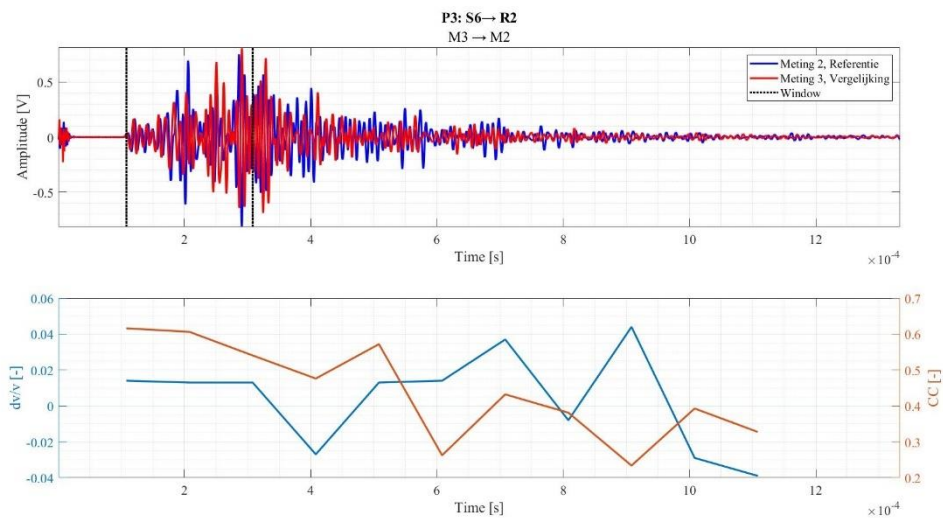


1.2.6 Sensorpaar 8-0, Meting 5->4

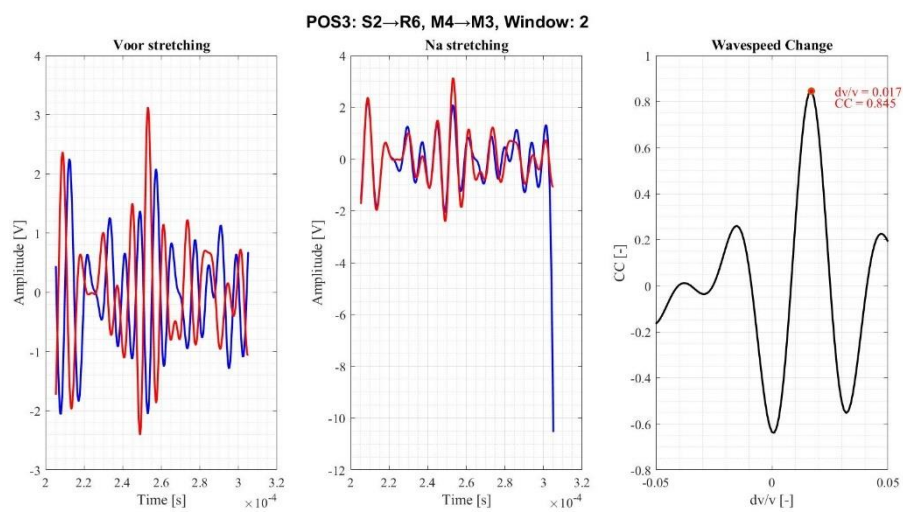
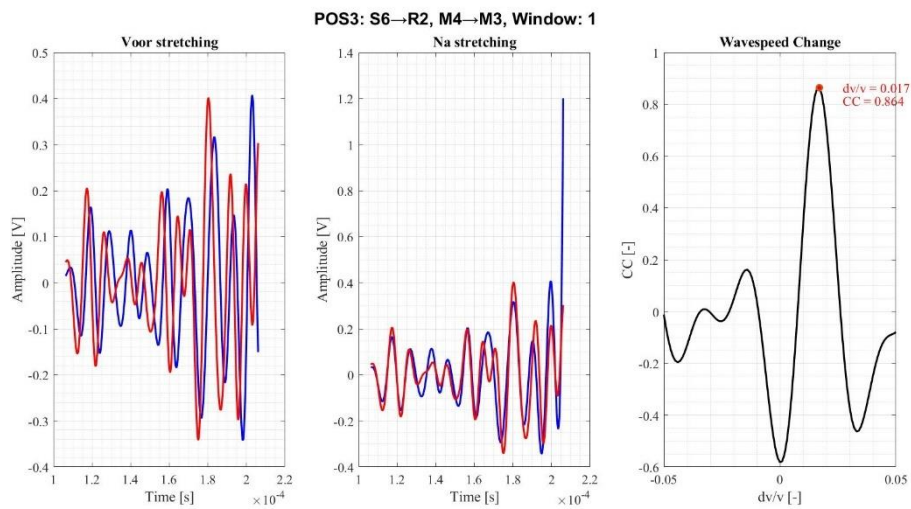
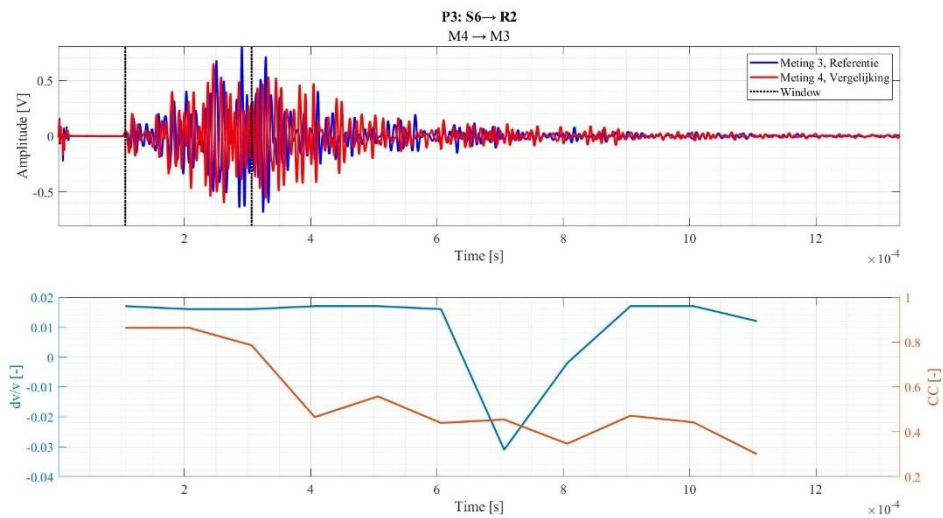


1.3 Sensorpaar 6 – 2 v.v.

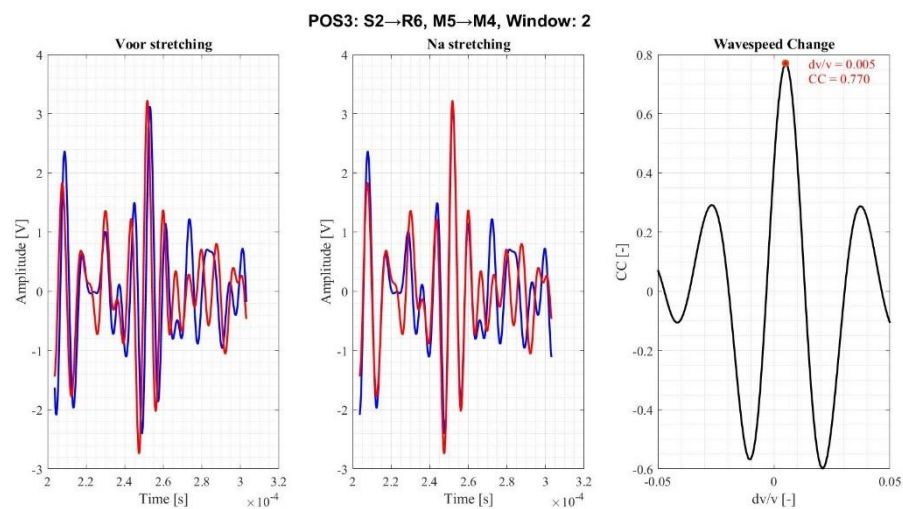
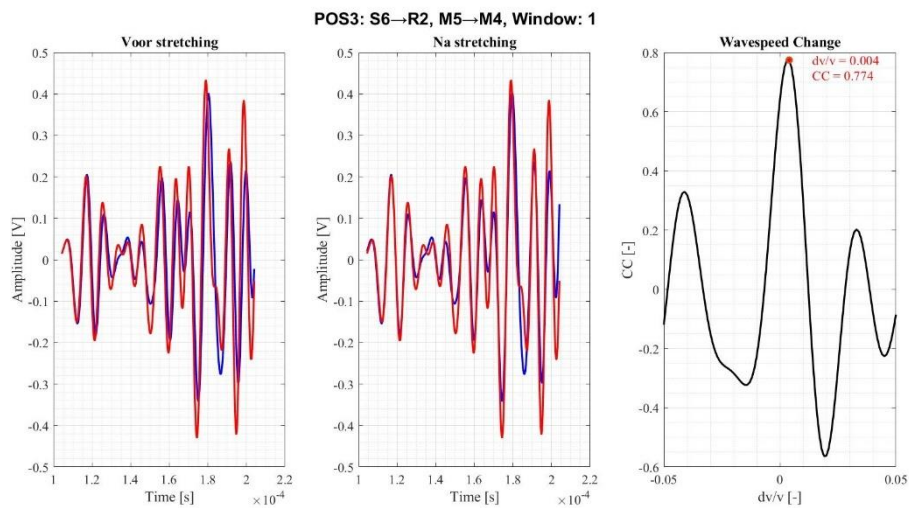
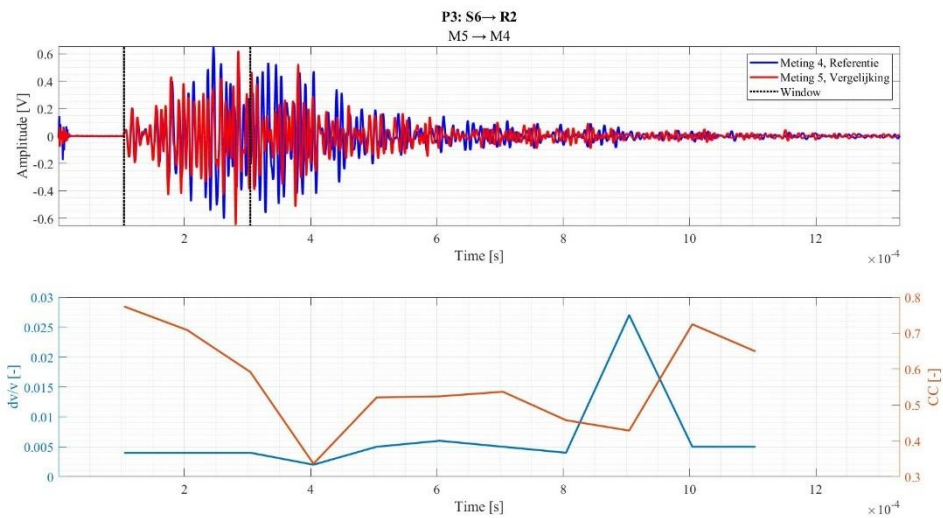
1.3.1 Sensorpaar 6-2, Meting 3->2



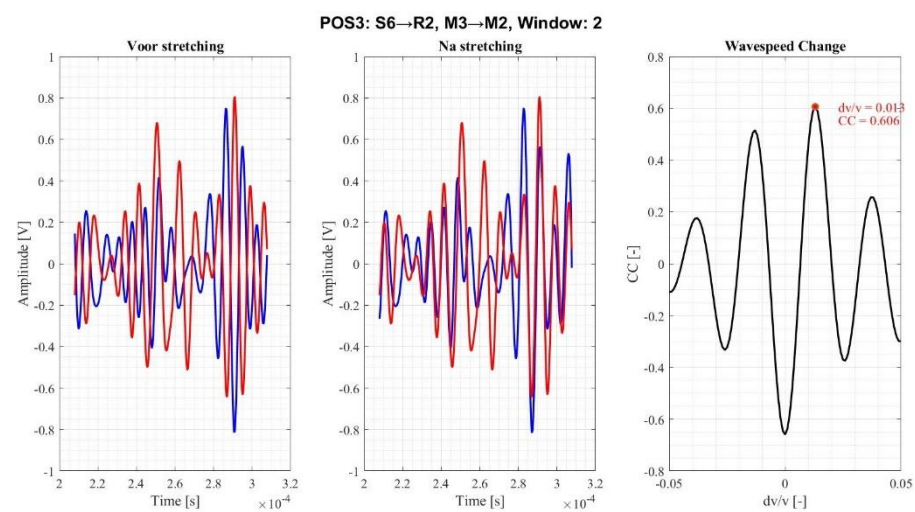
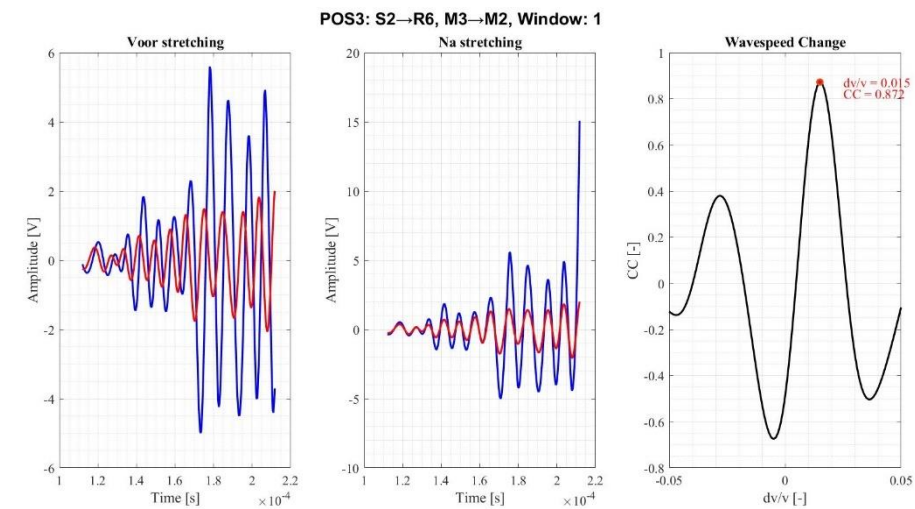
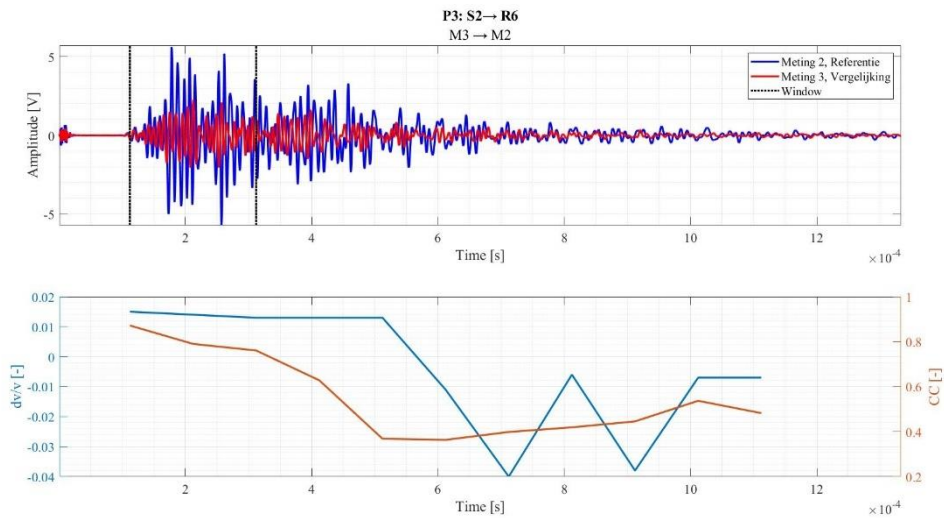
1.3.2 Sensorpaar 6-2, Meting 4->3



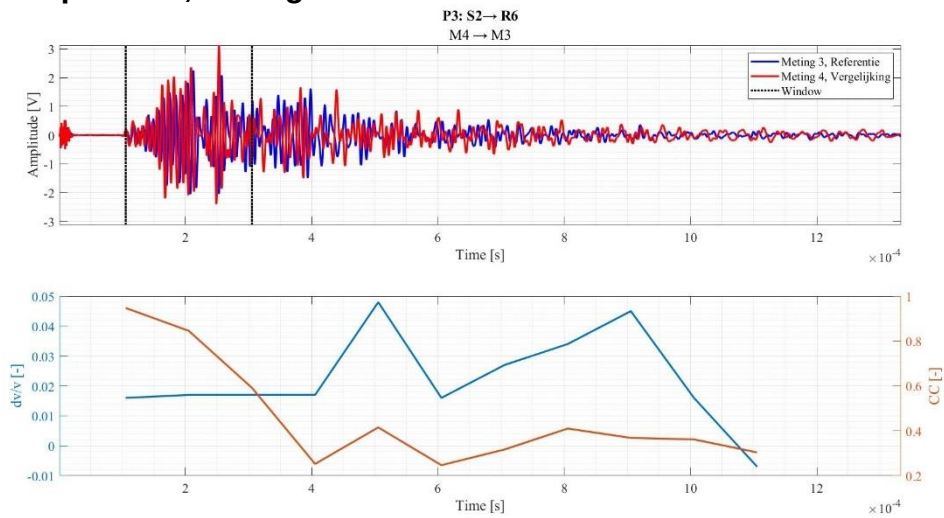
1.3.3 Sensorpaar 6-2, Meting 5->4



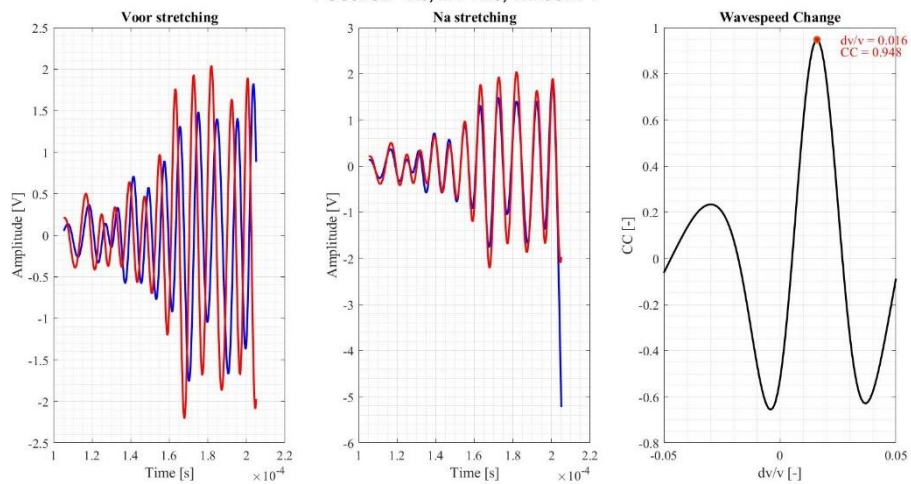
1.3.4 Sensorpaar 2-6, Meting 3->2



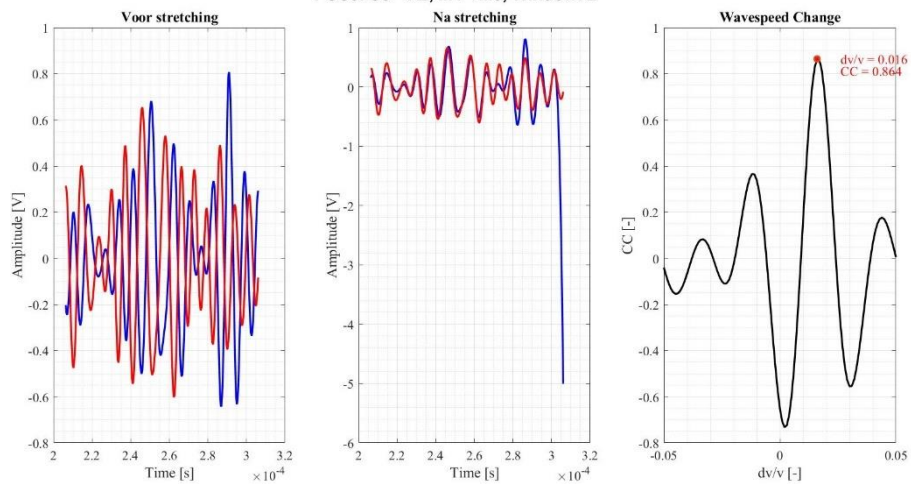
1.3.5 Sensorpaar 2-6, Meting 4->3



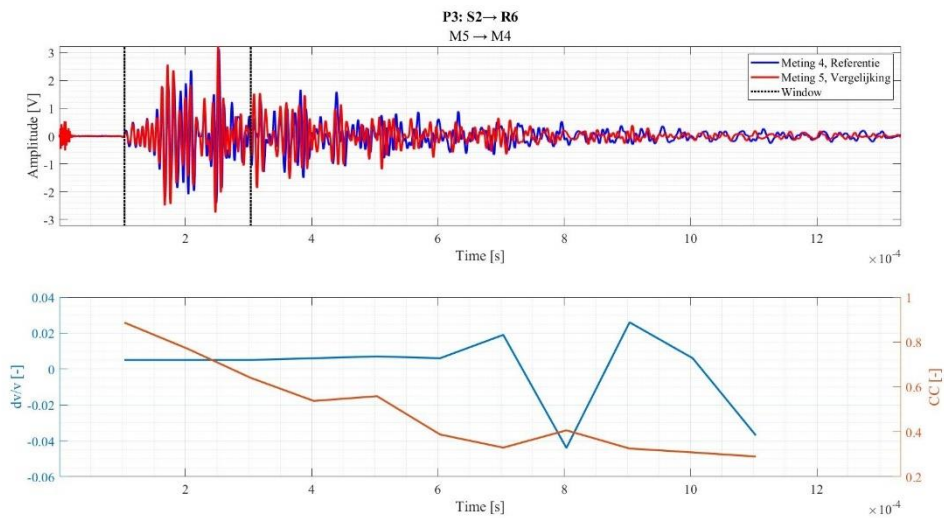
POS3: S2→R6, M4→M3, Window: 1



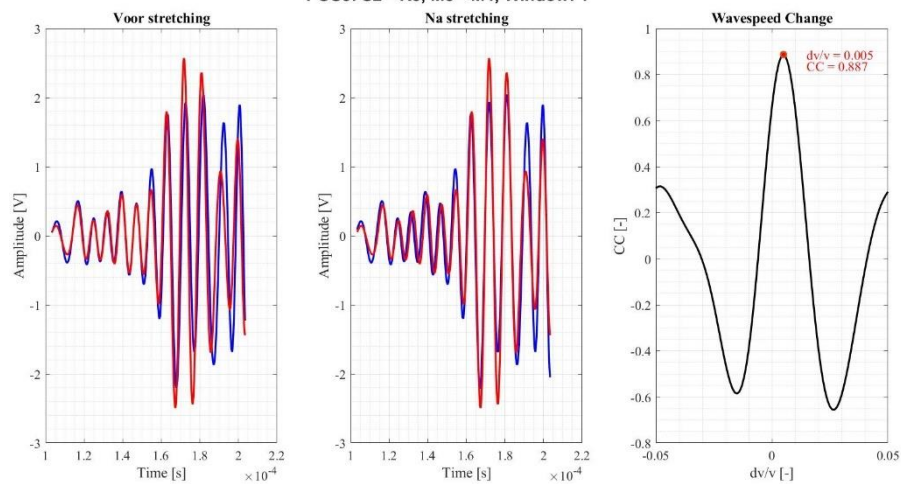
POS3: S6→R2, M4→M3, Window: 2



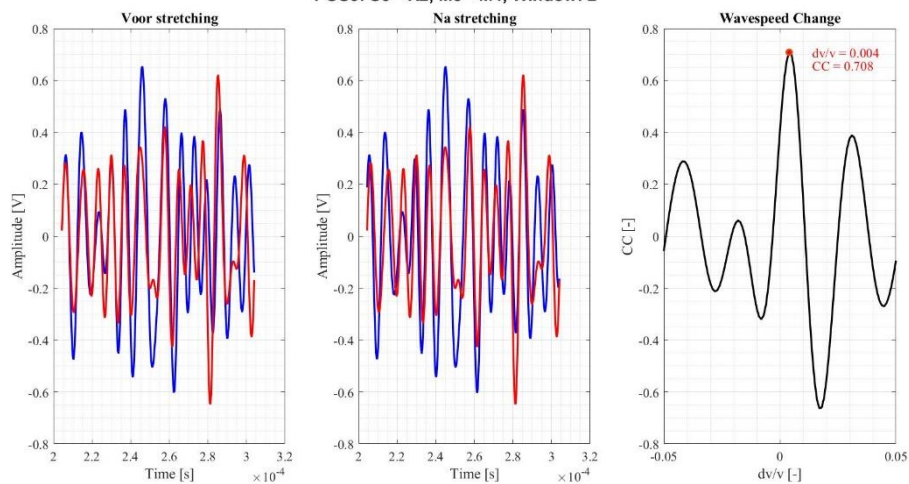
1.3.6 Sensorpaar 2-6, Meting 5->4



POS3: S2→R6, M5→M4, Window: 1

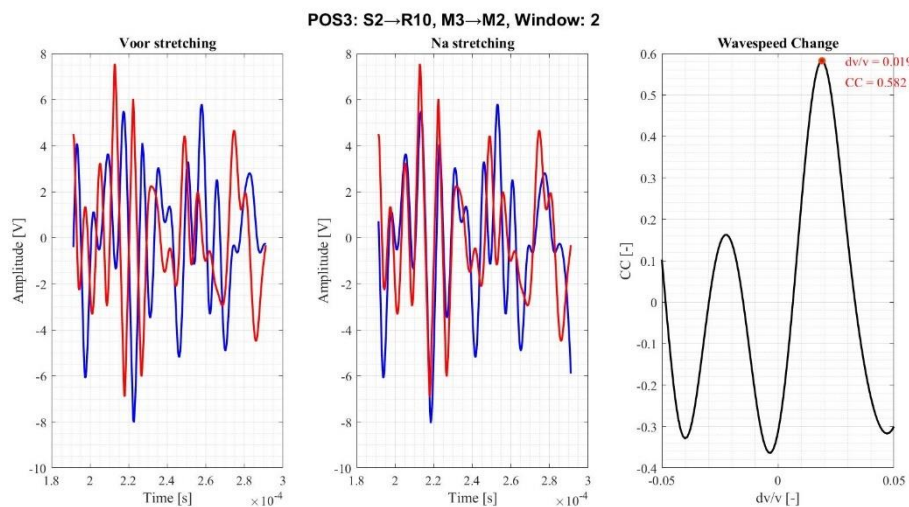
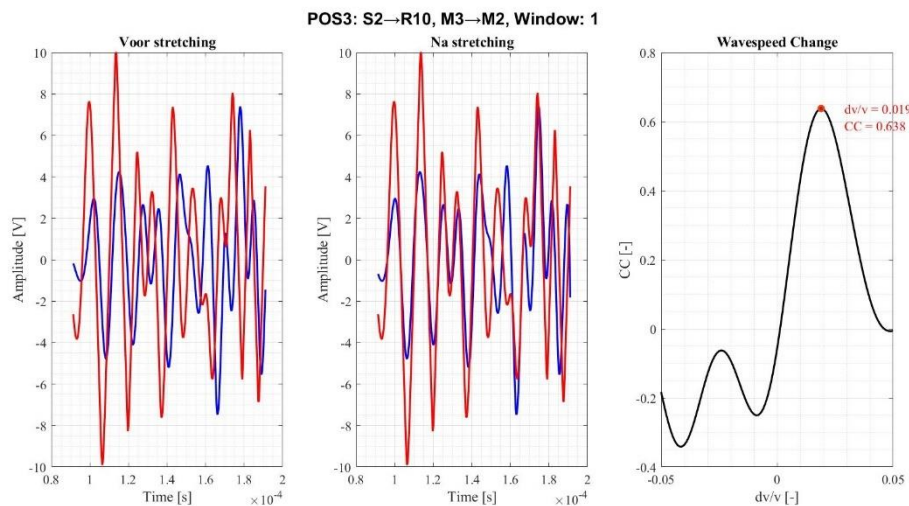
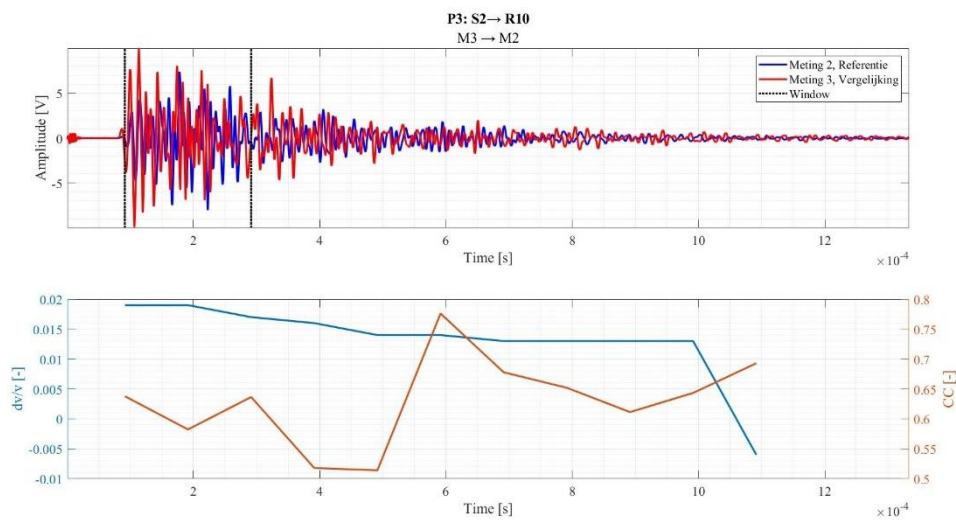


POS3: S6→R2, M5→M4, Window: 2

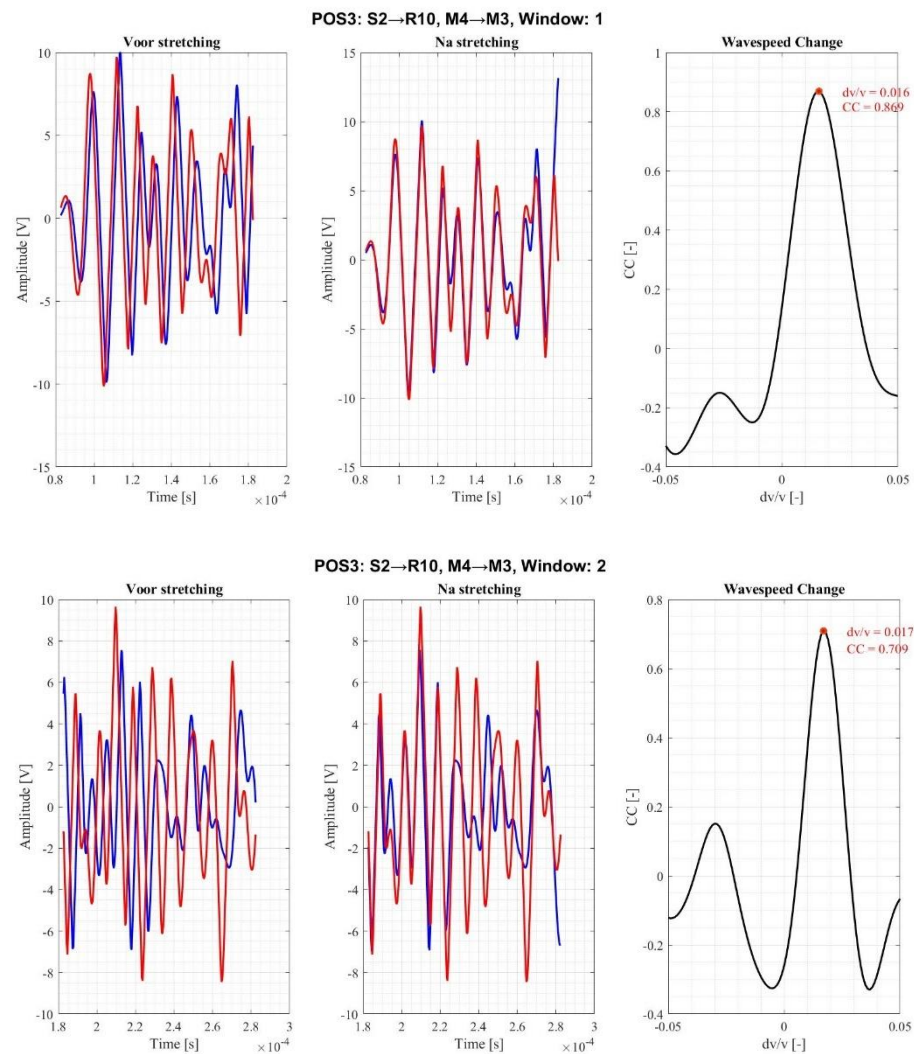
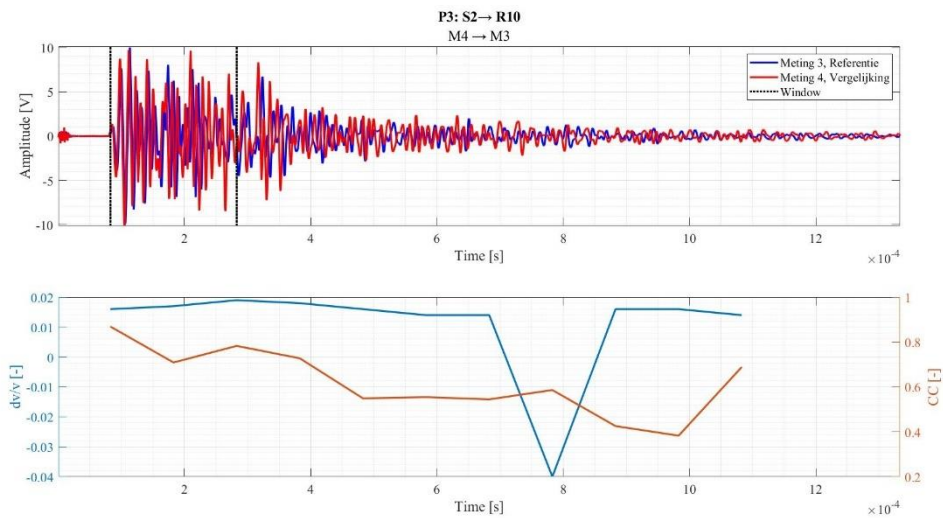


1.4 Sensorpaar 2 – 10 v.v.

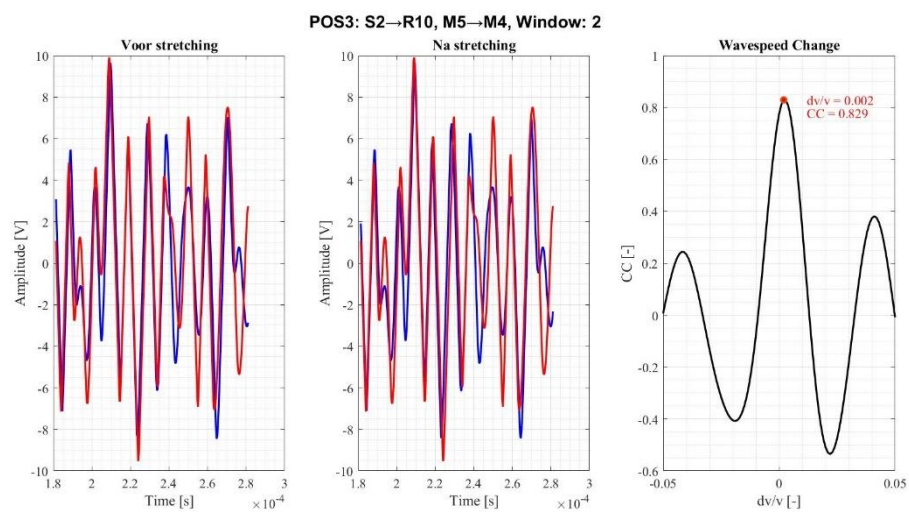
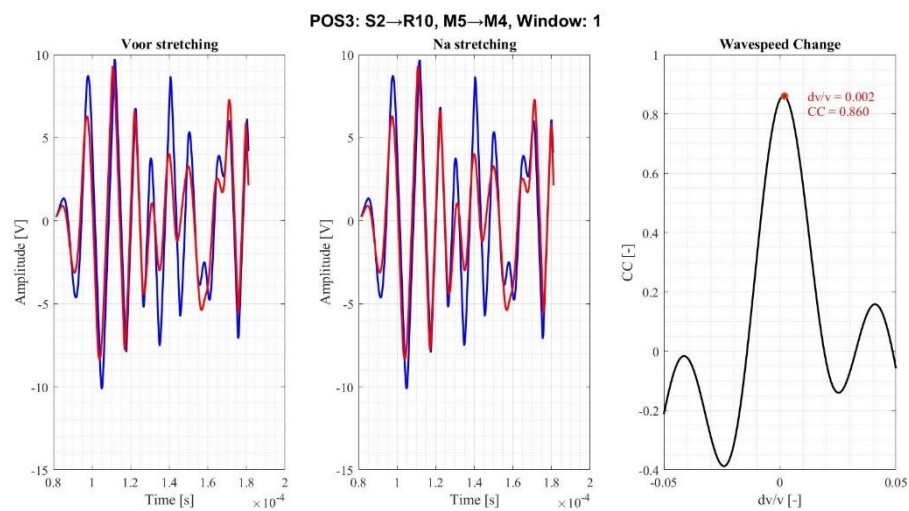
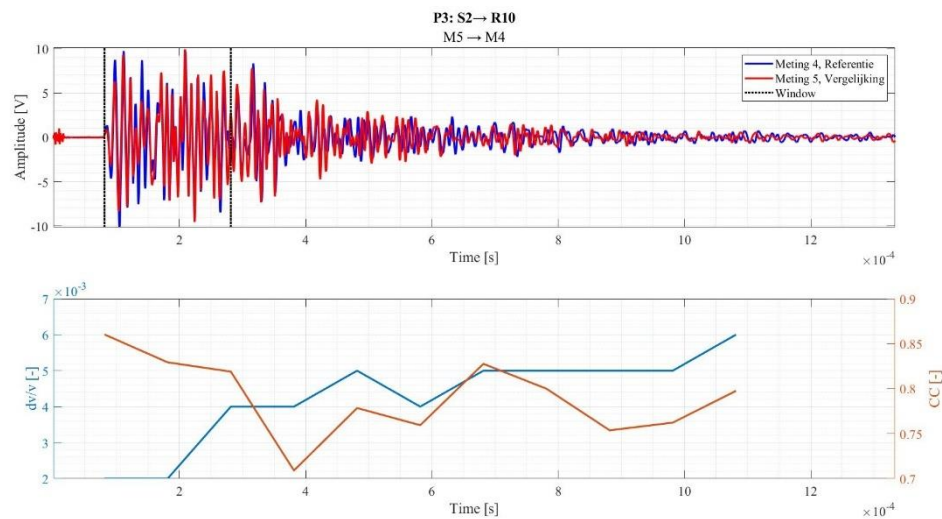
1.4.1 Sensorpaar 2-10, Meting 3->2



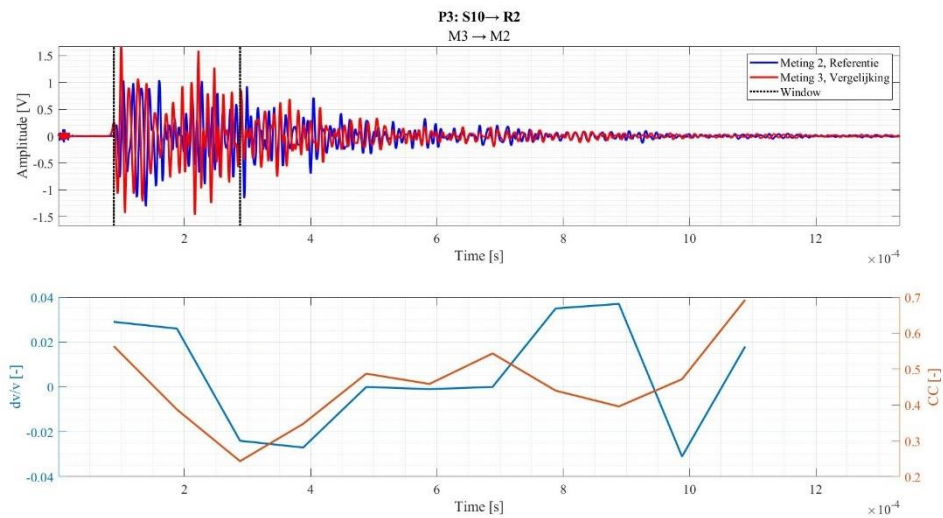
1.4.2 Sensorpaar 2-10, Meting 4->3



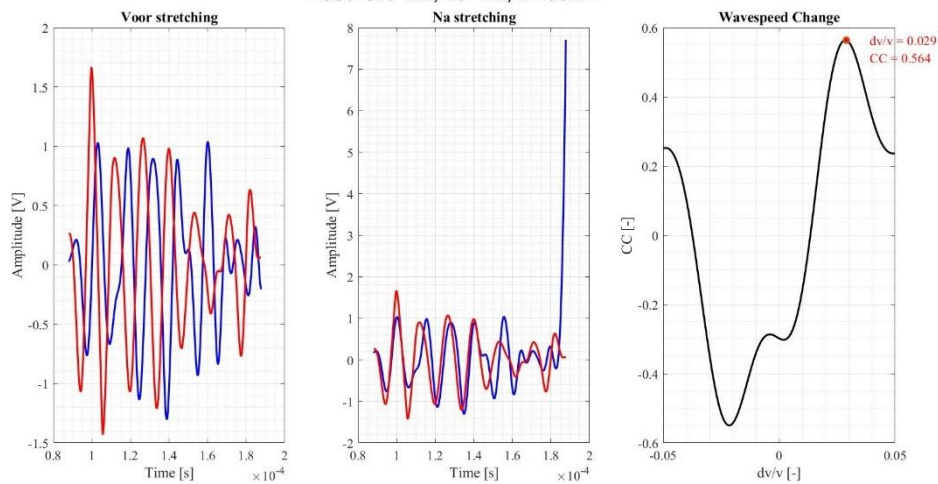
1.4.3 Sensorpaar 2-10, Meting 5->4



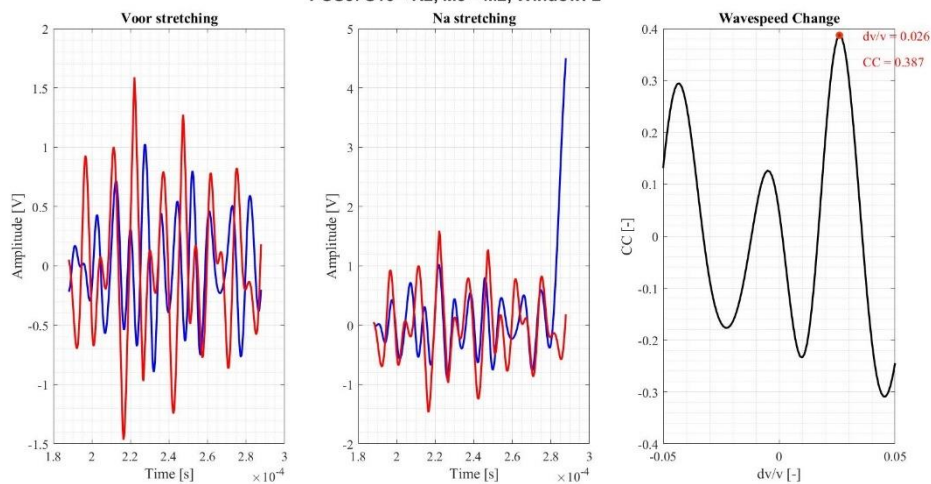
1.4.4 Sensorpaar 10-2, Meting 3->2



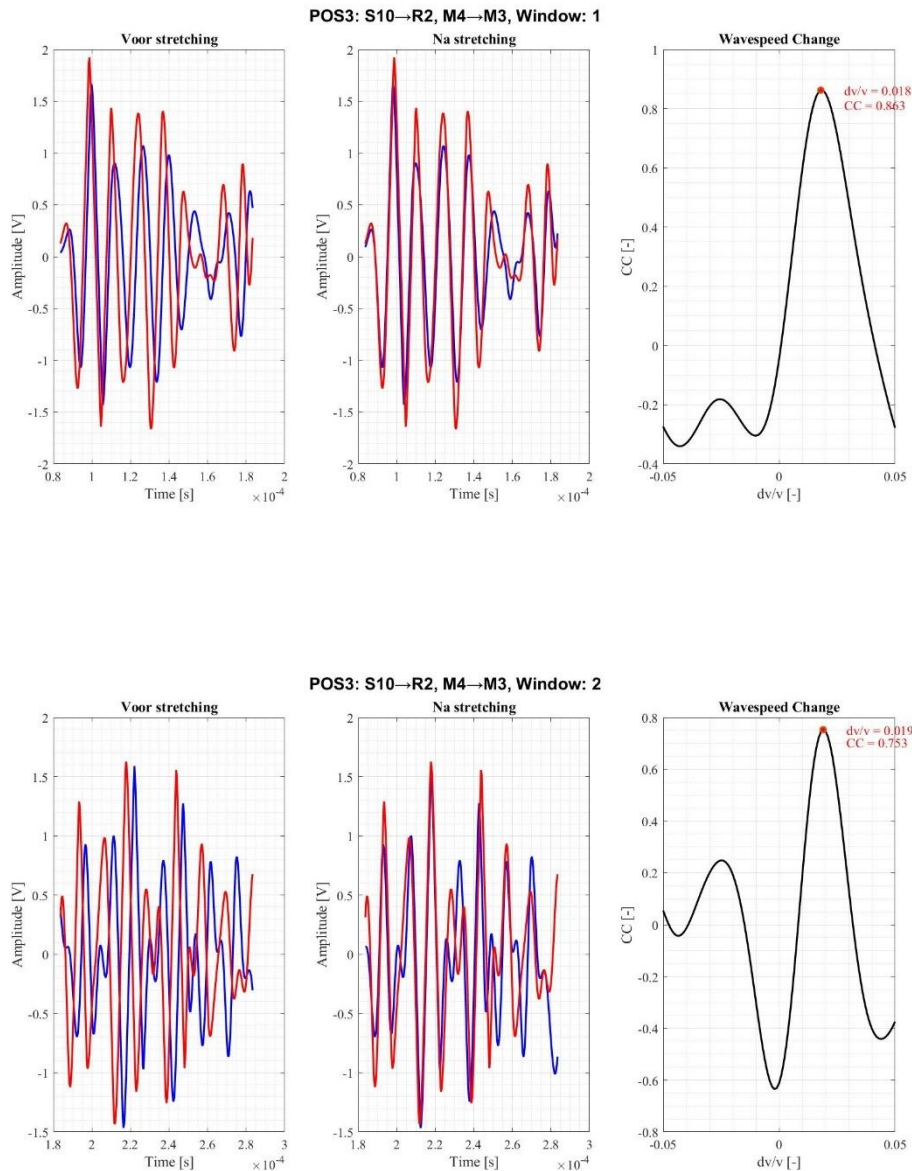
POS3: S10→R2, M3→M2, Window: 1



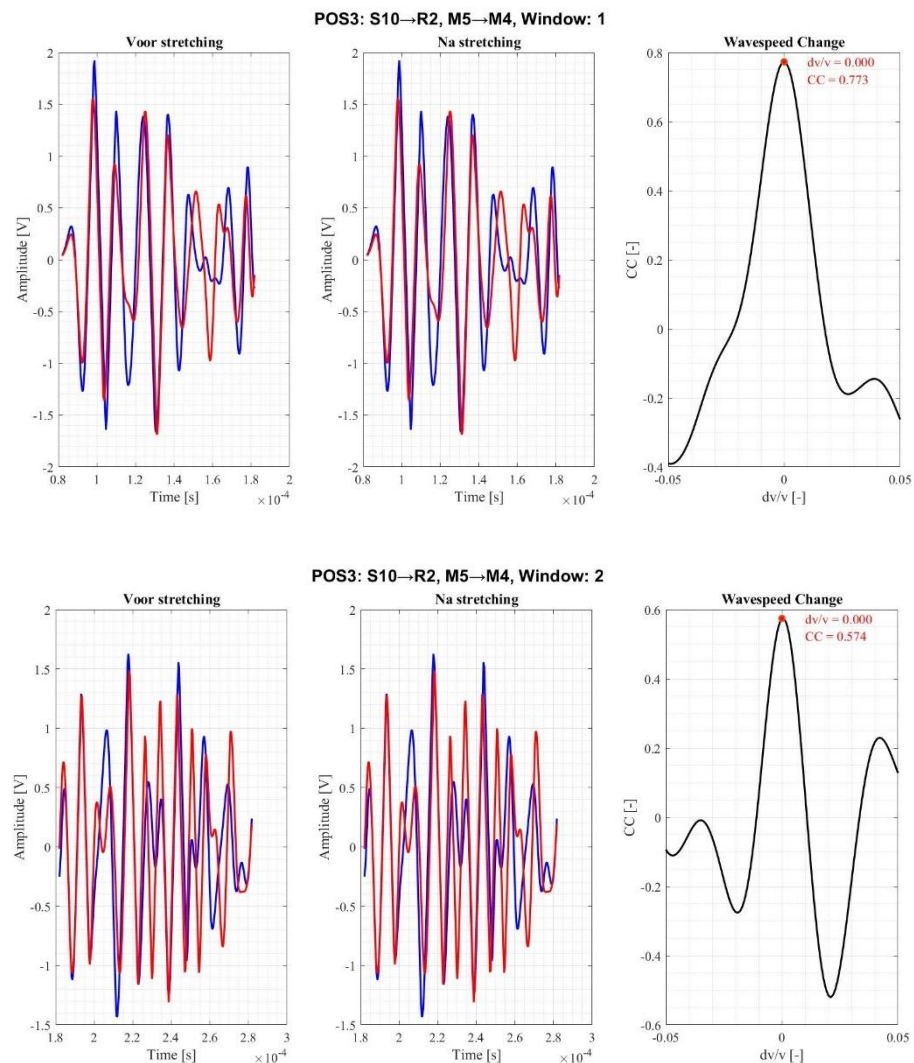
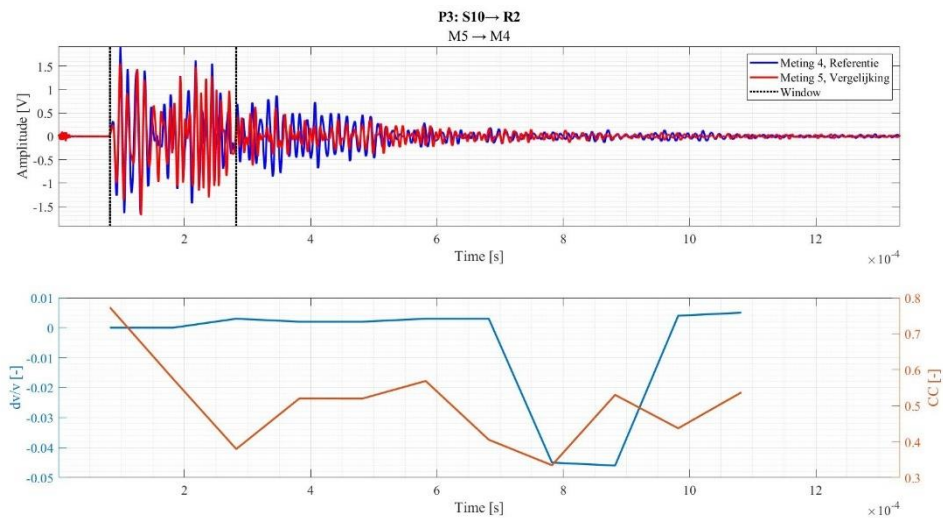
POS3: S10→R2, M3→M2, Window: 2



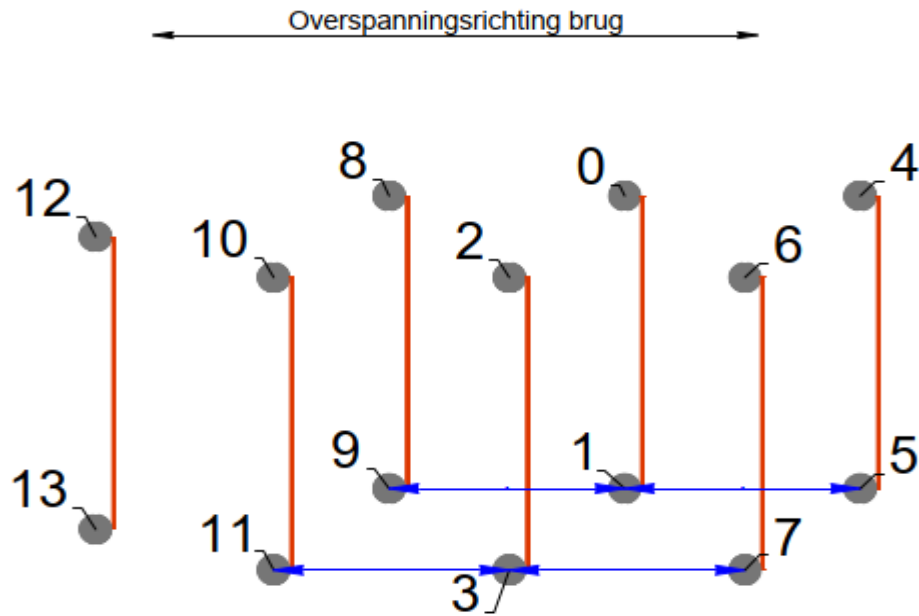
1.4.5 Sensorpaar 10-2, Meting 4->3



1.4.6 Sensorpaar 10-2, Meting 5->4

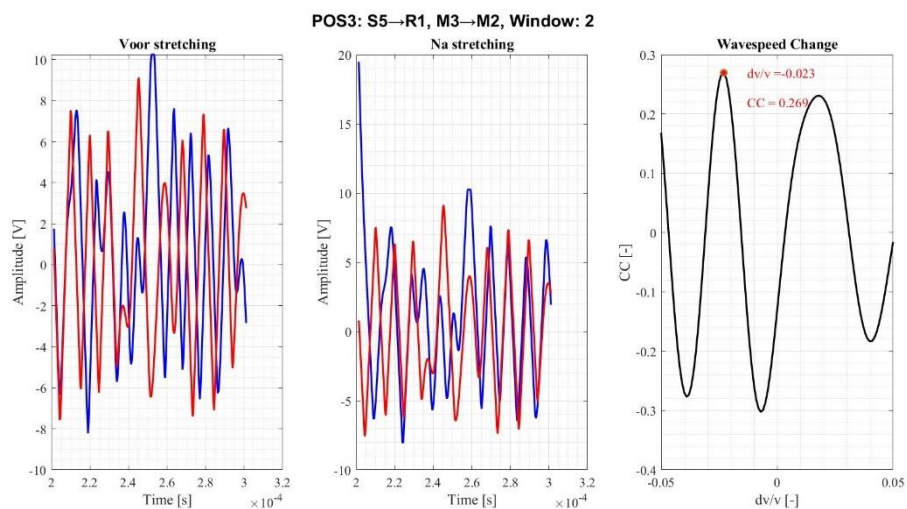
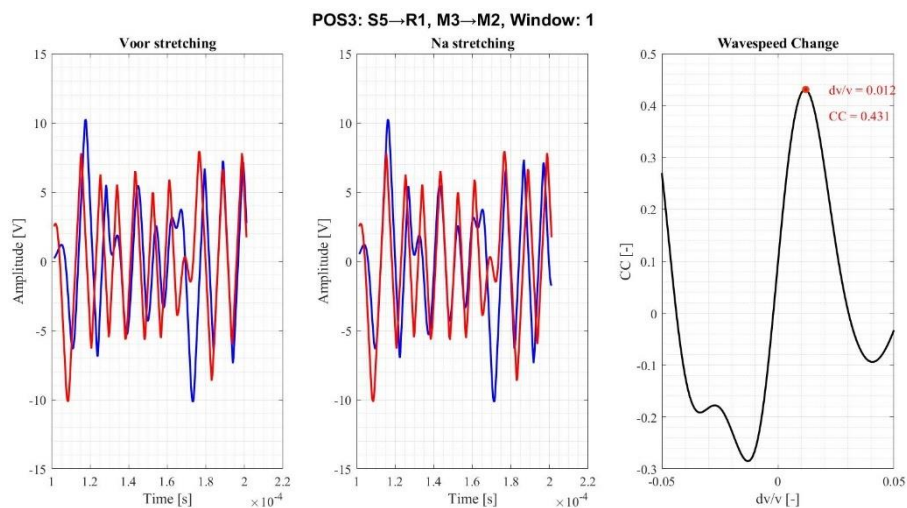
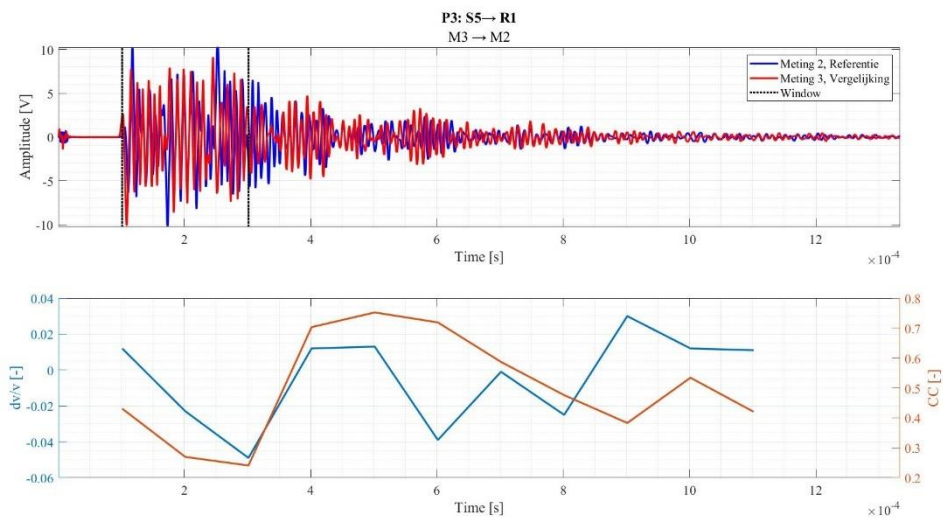


2 CWI POS3 – ONDERZIJDE

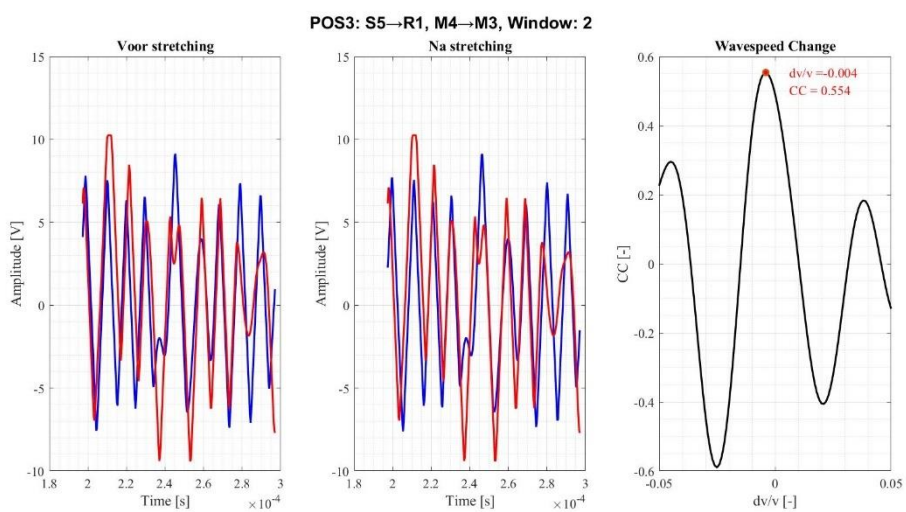
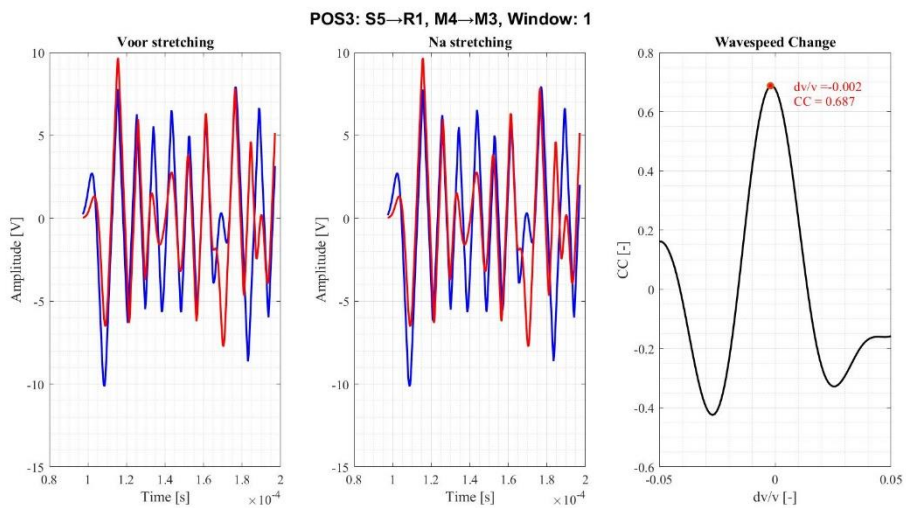
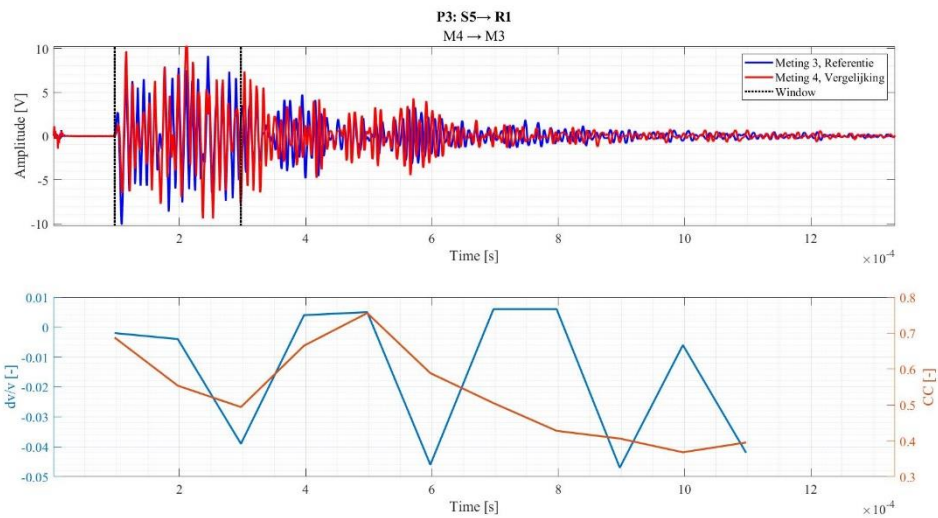


2.1 Sensorpaar 5 – 1 v.v.

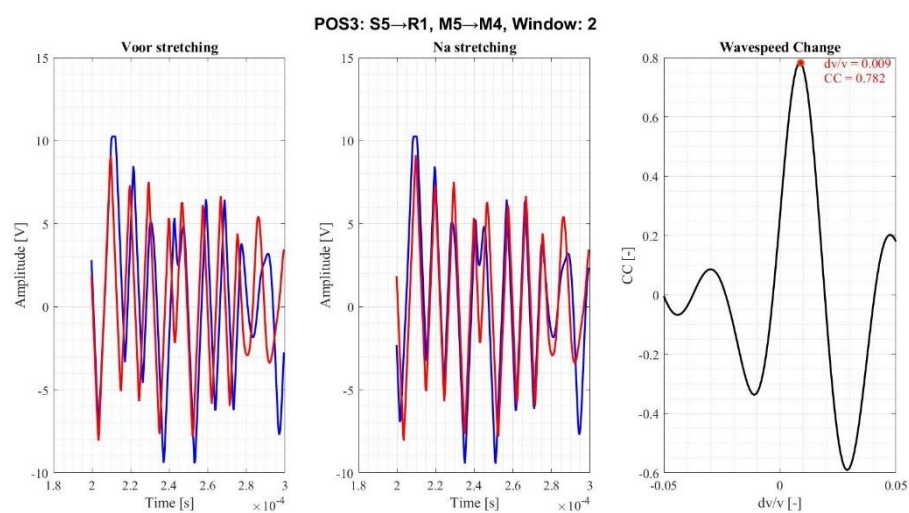
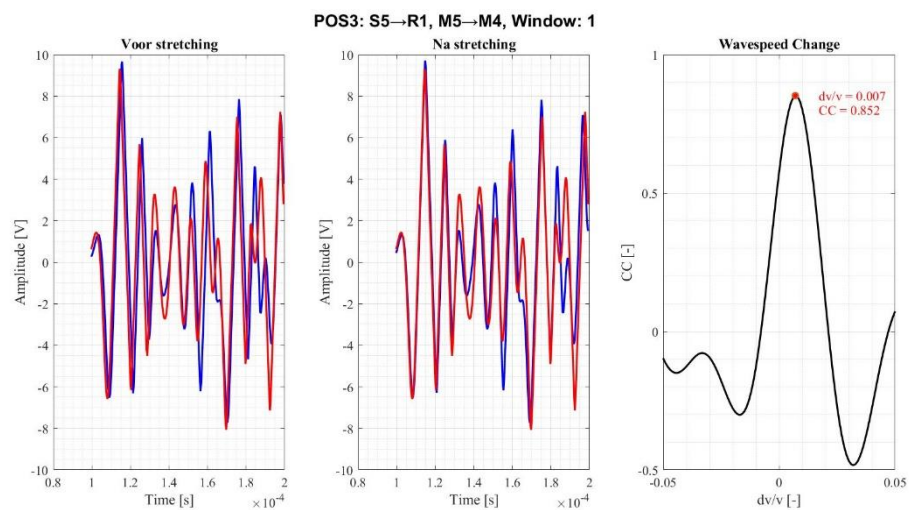
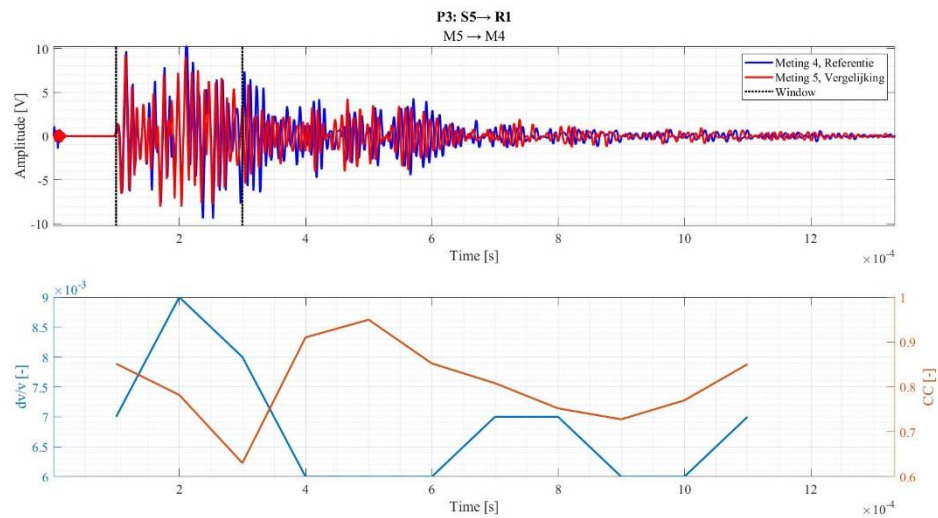
2.1.1 Sensorpaar 5-1, Meting 3->2



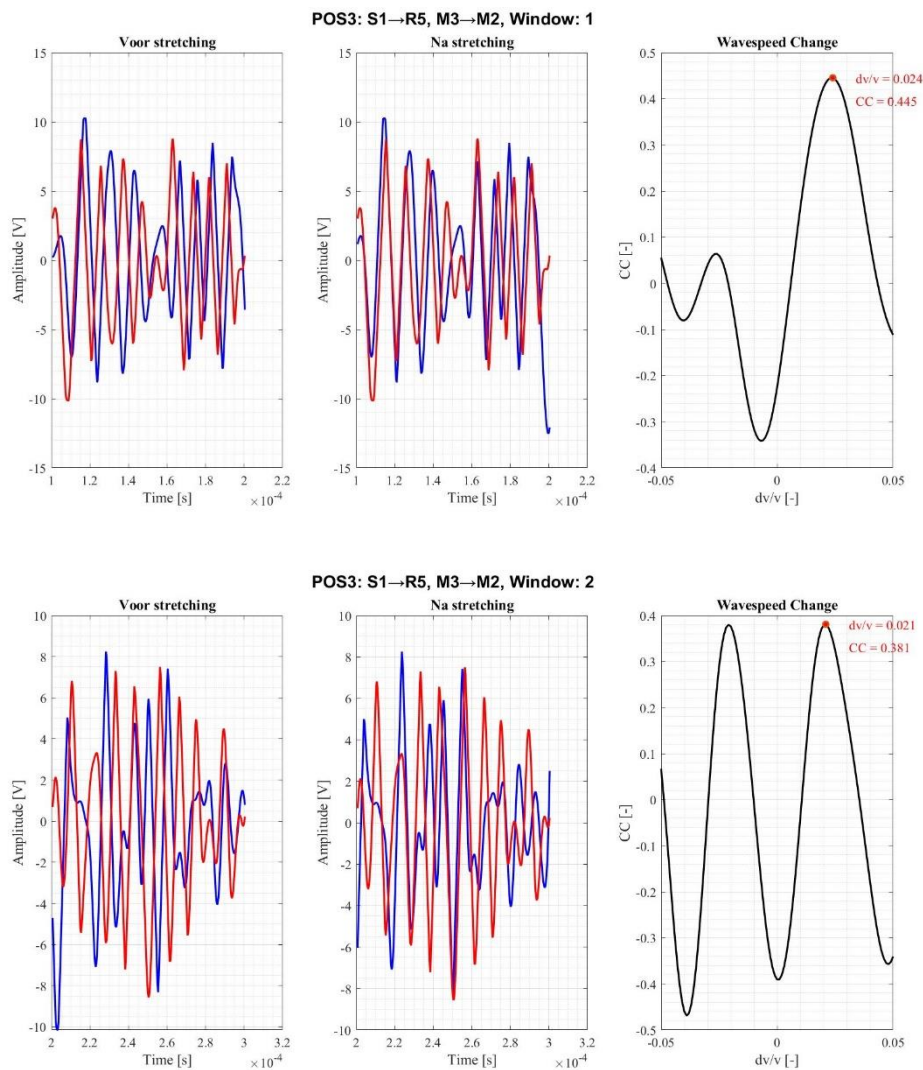
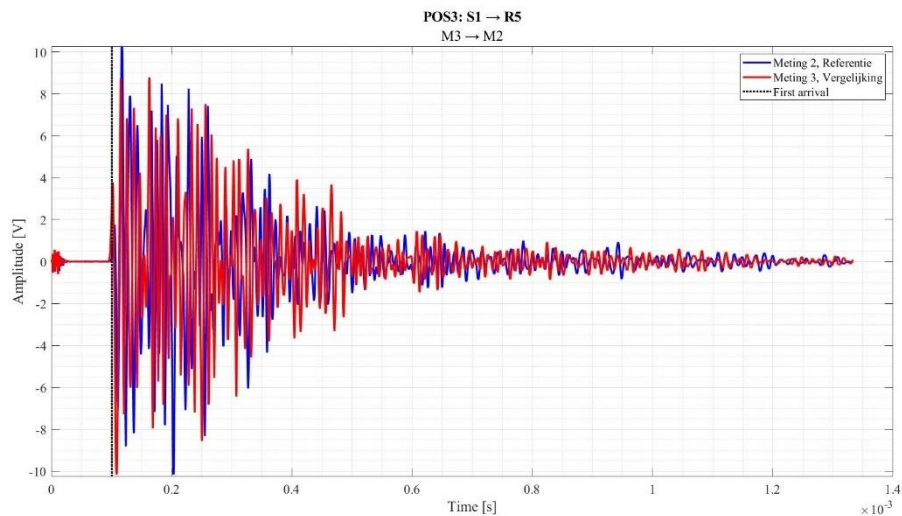
2.1.2 Sensorpaar 5-1, Meting 4->3



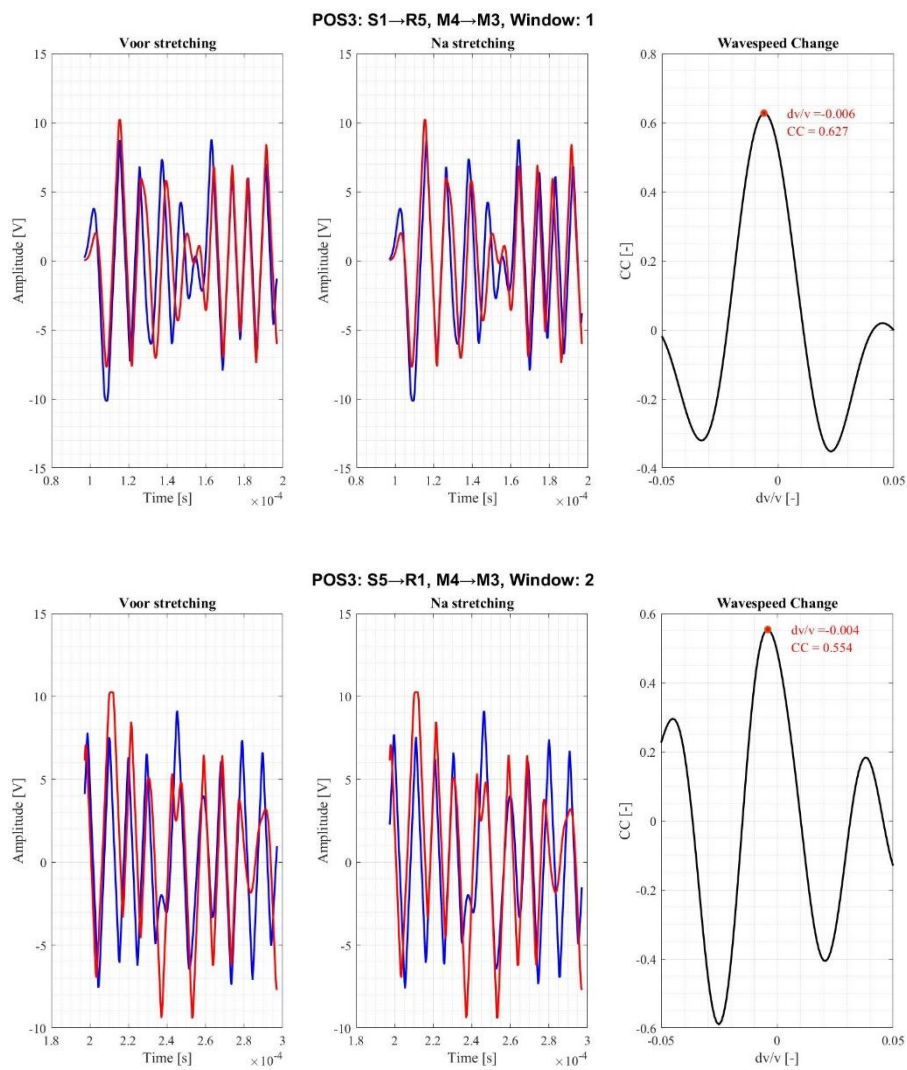
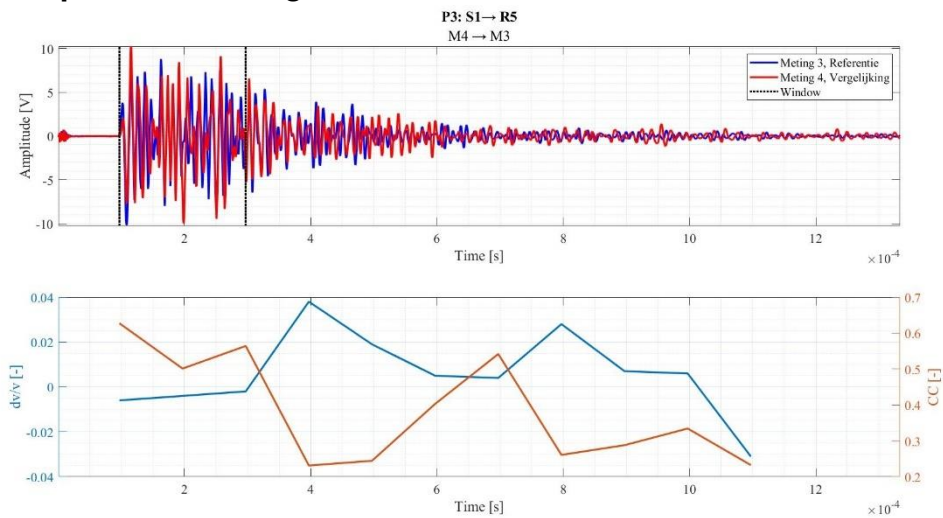
2.1.3 Sensorpaar 5-1, Meting 5->4



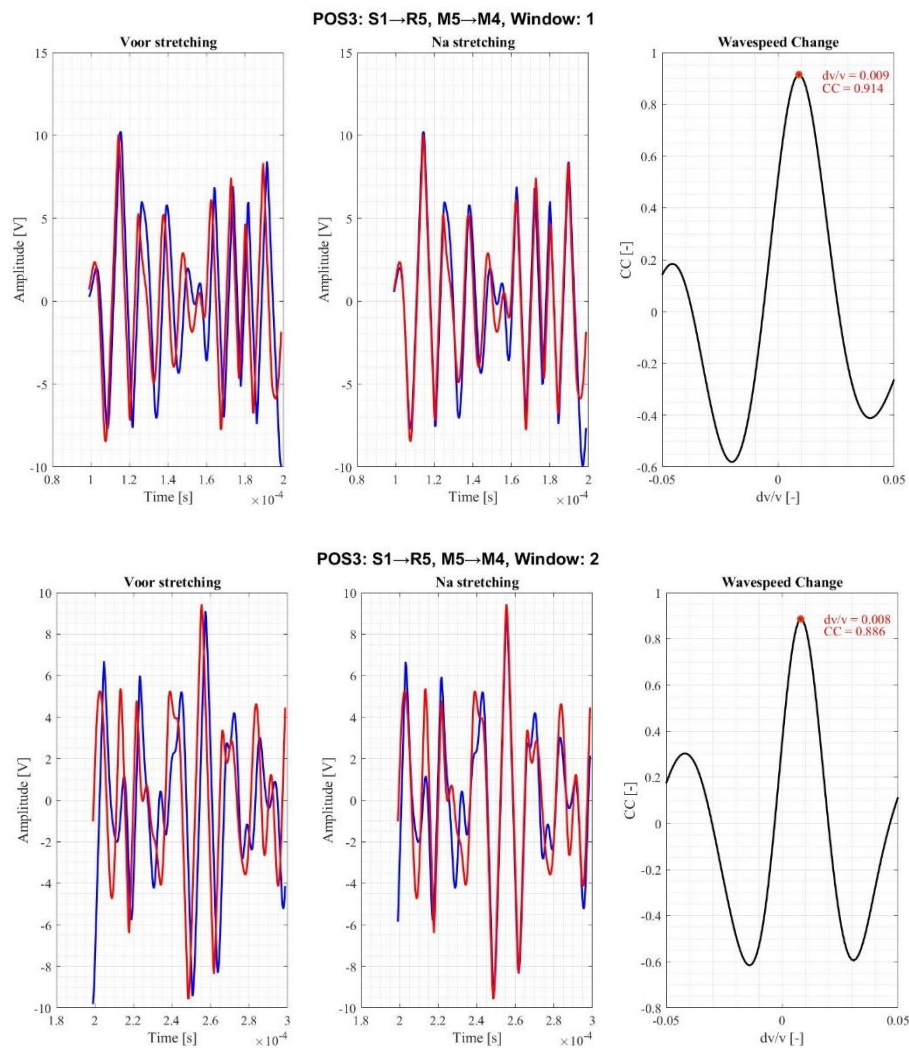
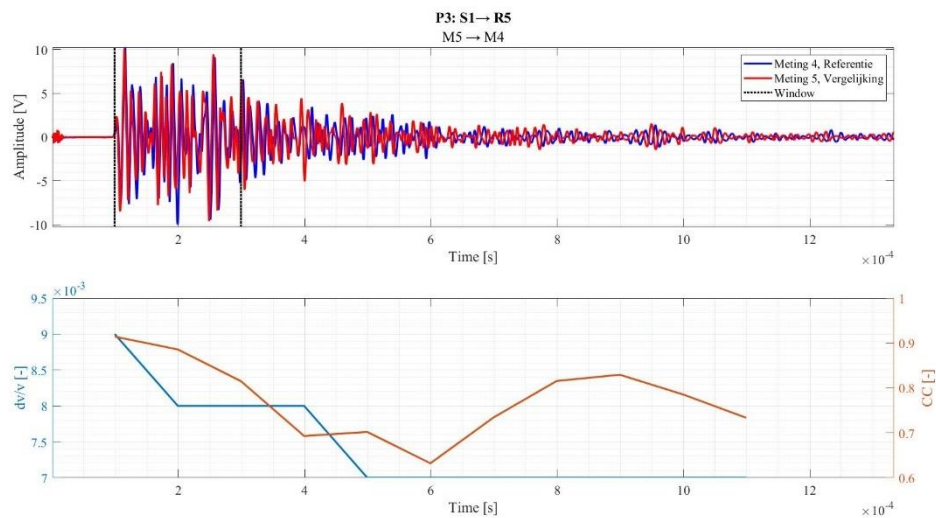
2.1.4 Sensorpaar 1-5, Meting 3->2



2.1.5 Sensorpaar 1-5, Meting 4->3

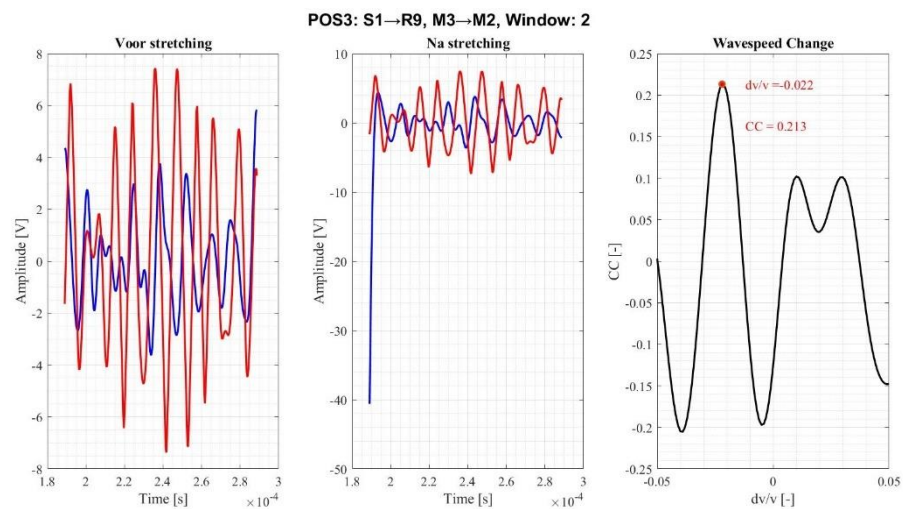
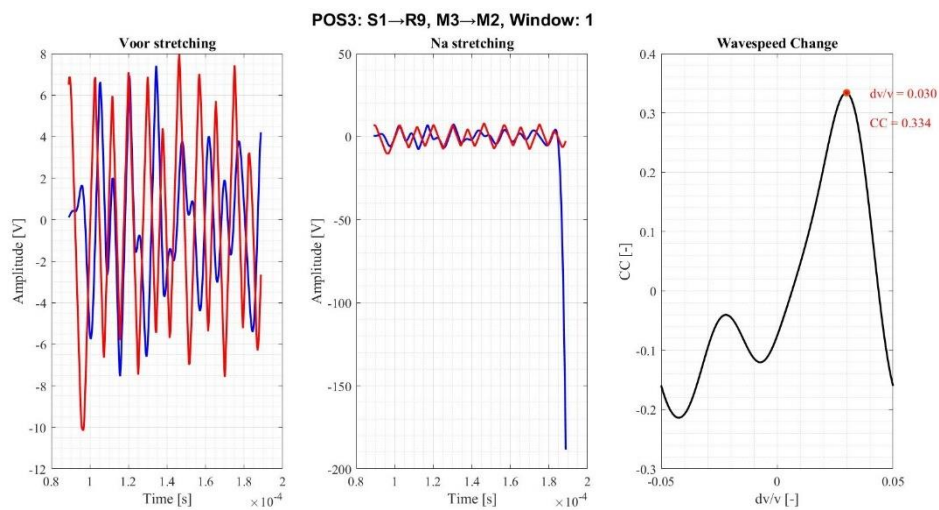
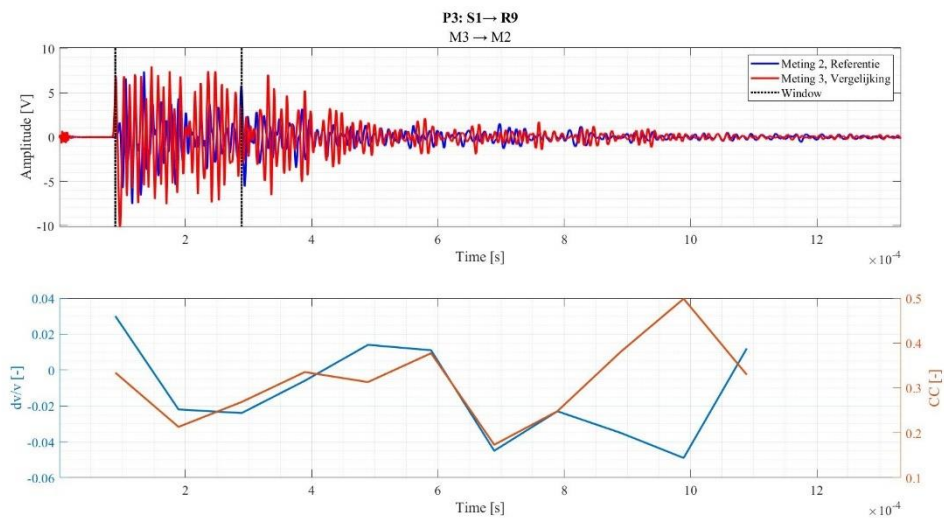


2.1.6 Sensorpaar 1-5, Meting 5->4

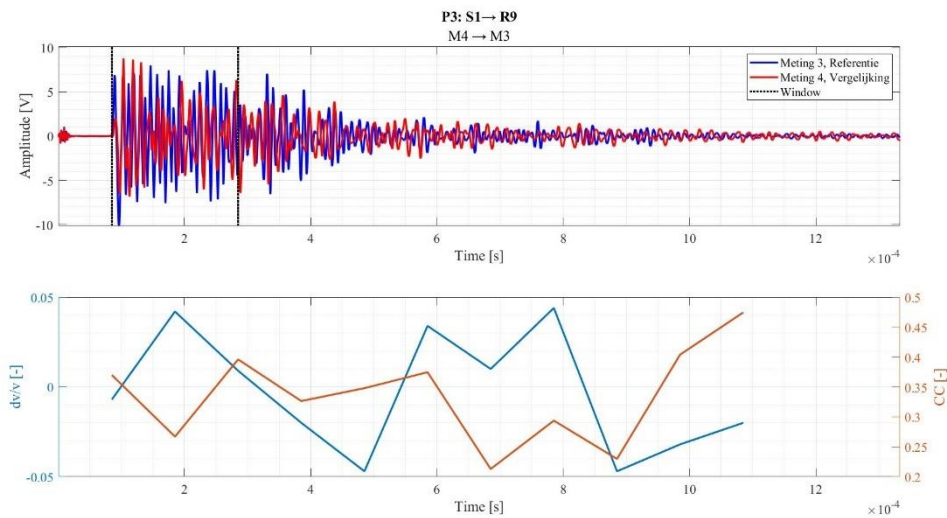


2.2 Sensorpaar 1 – 9 v.v.

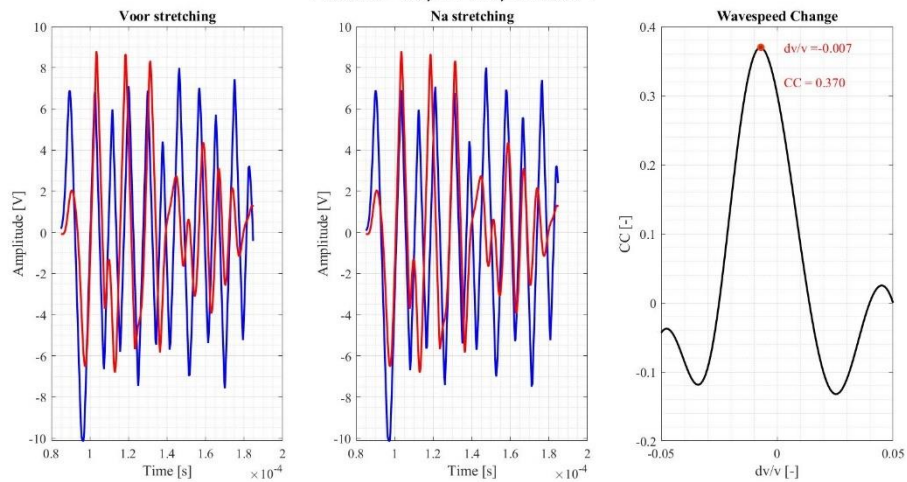
2.2.1 Sensorpaar 1-9, Meting 3->2



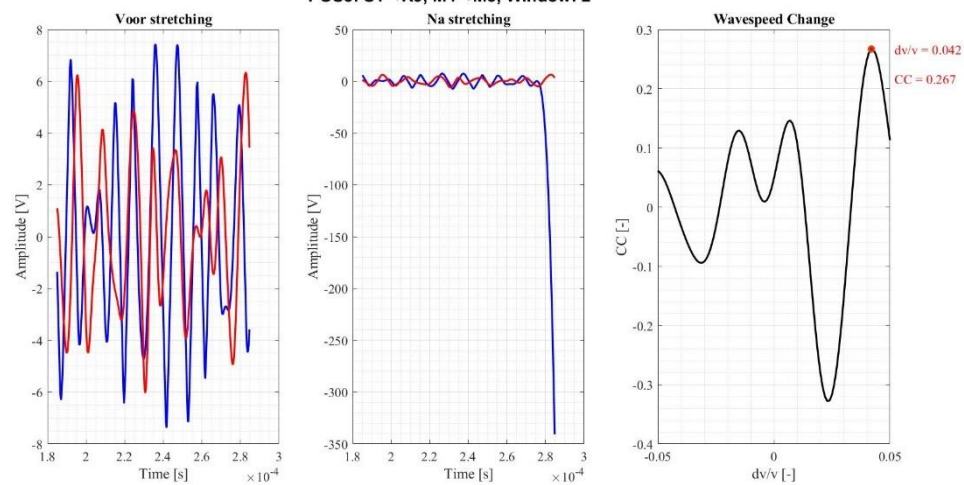
2.2.2 Sensorpaar 1-9, Meting 4->3



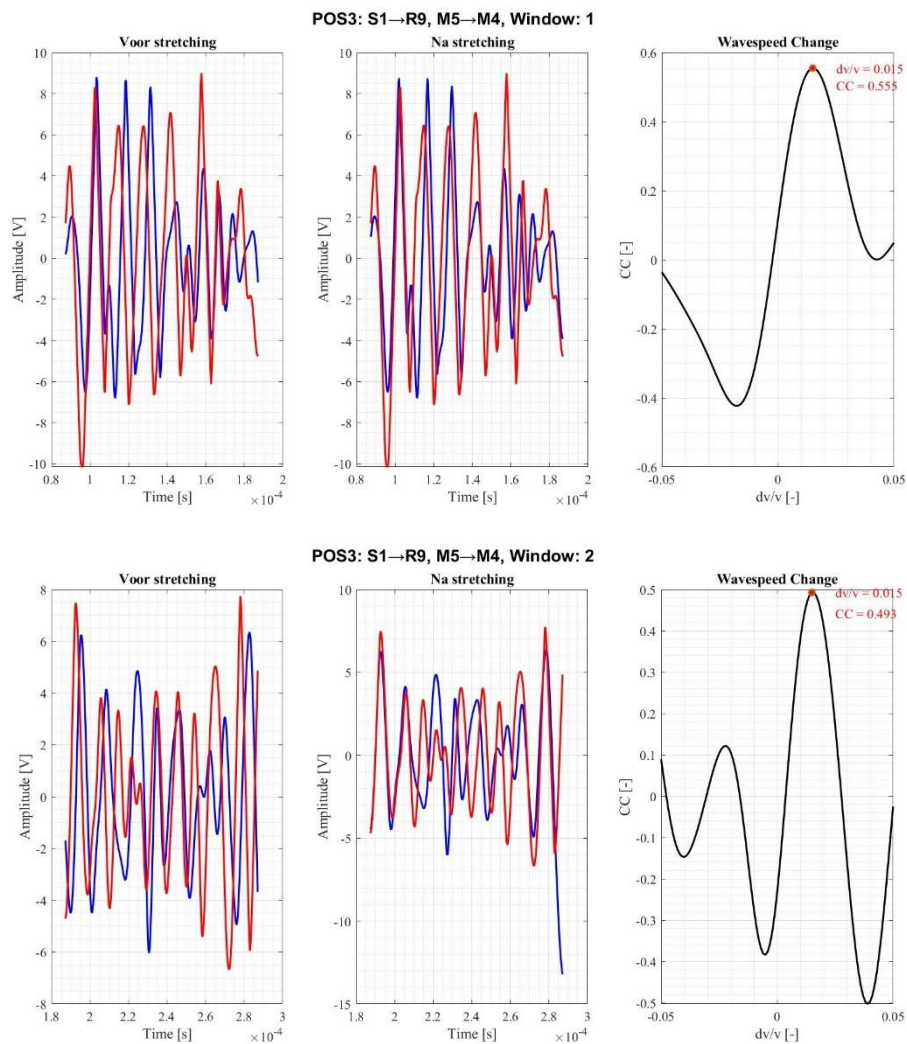
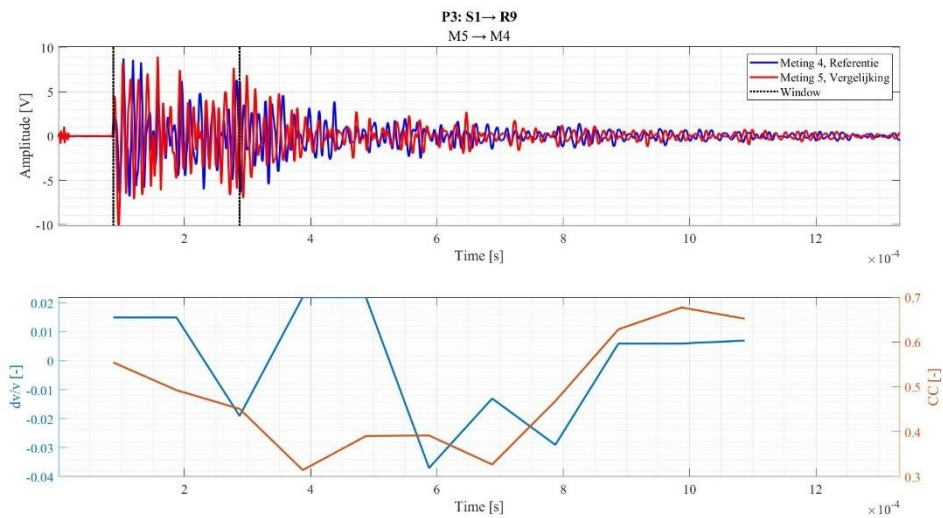
POS3: S1→R9, M4→M3, Window: 1



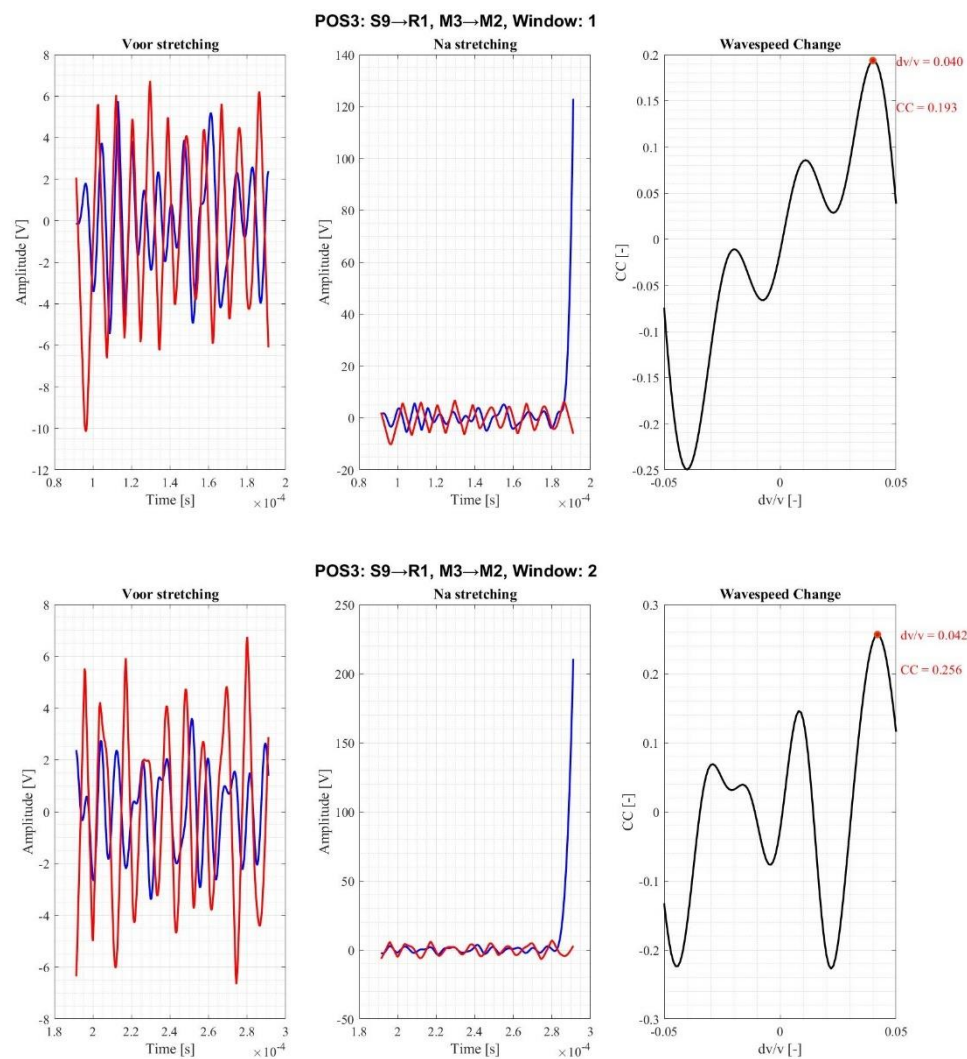
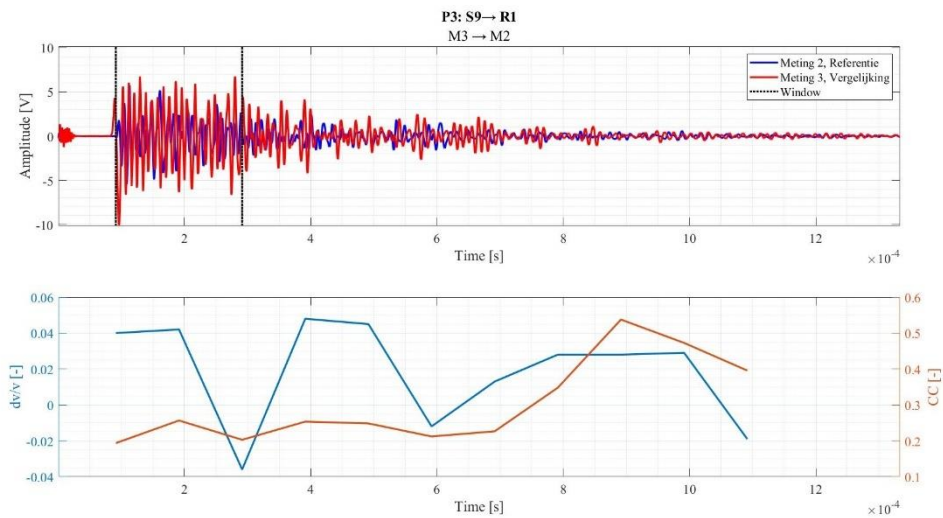
POS3: S1→R9, M4→M3, Window: 2



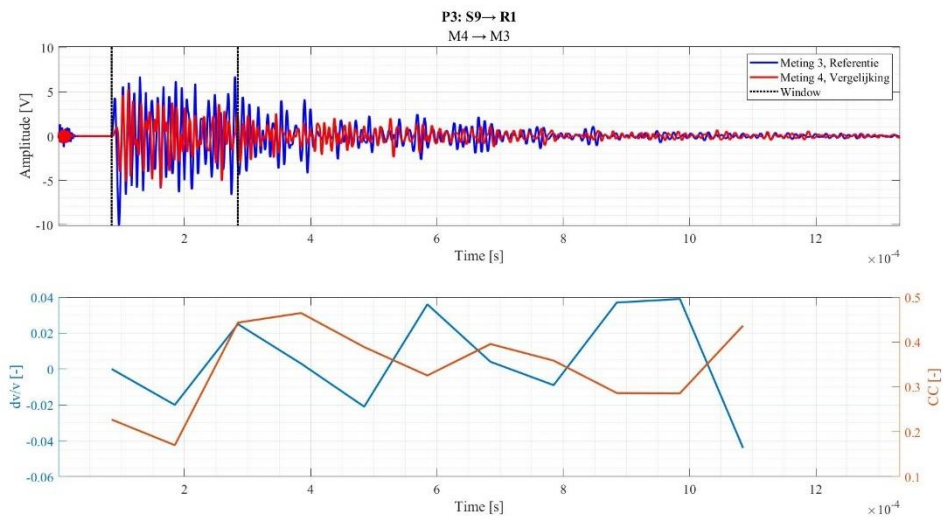
2.2.3 Sensorpaar 1-9, Meting 5->4



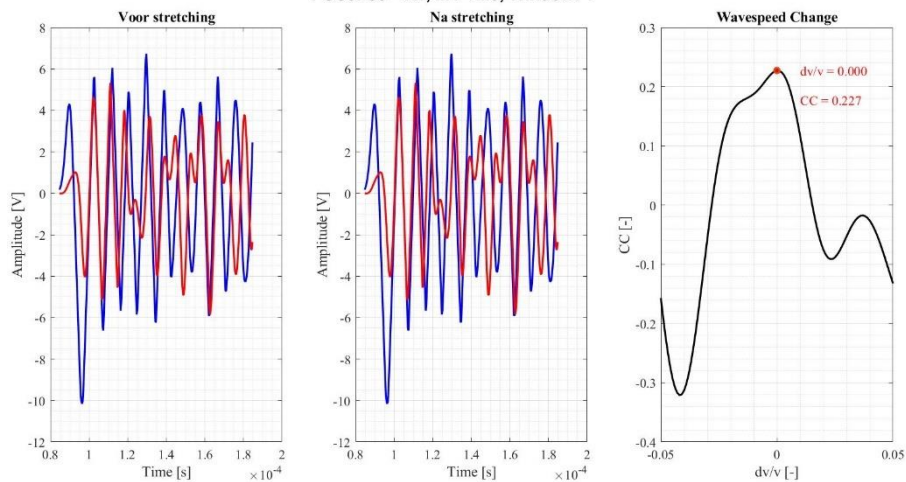
2.2.4 Sensorpaar 9-1, Meting 3->2



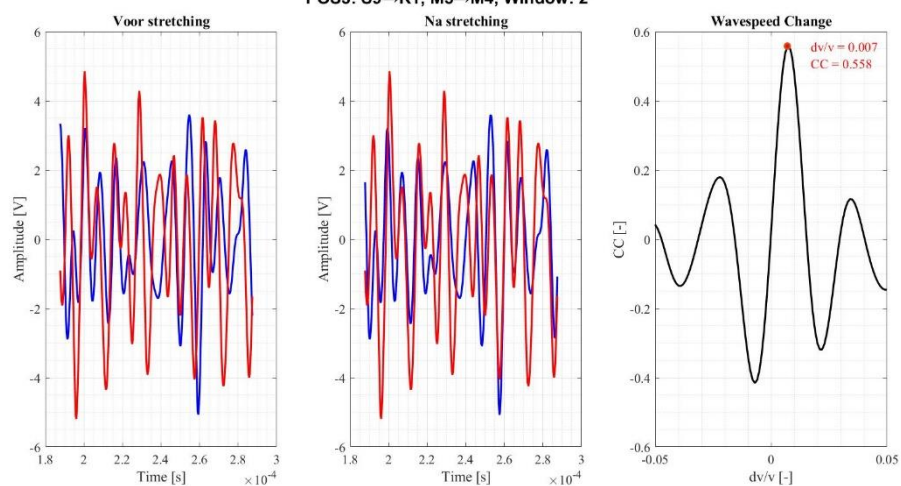
2.2.5 Sensorpaar 9-1, Meting 4->3



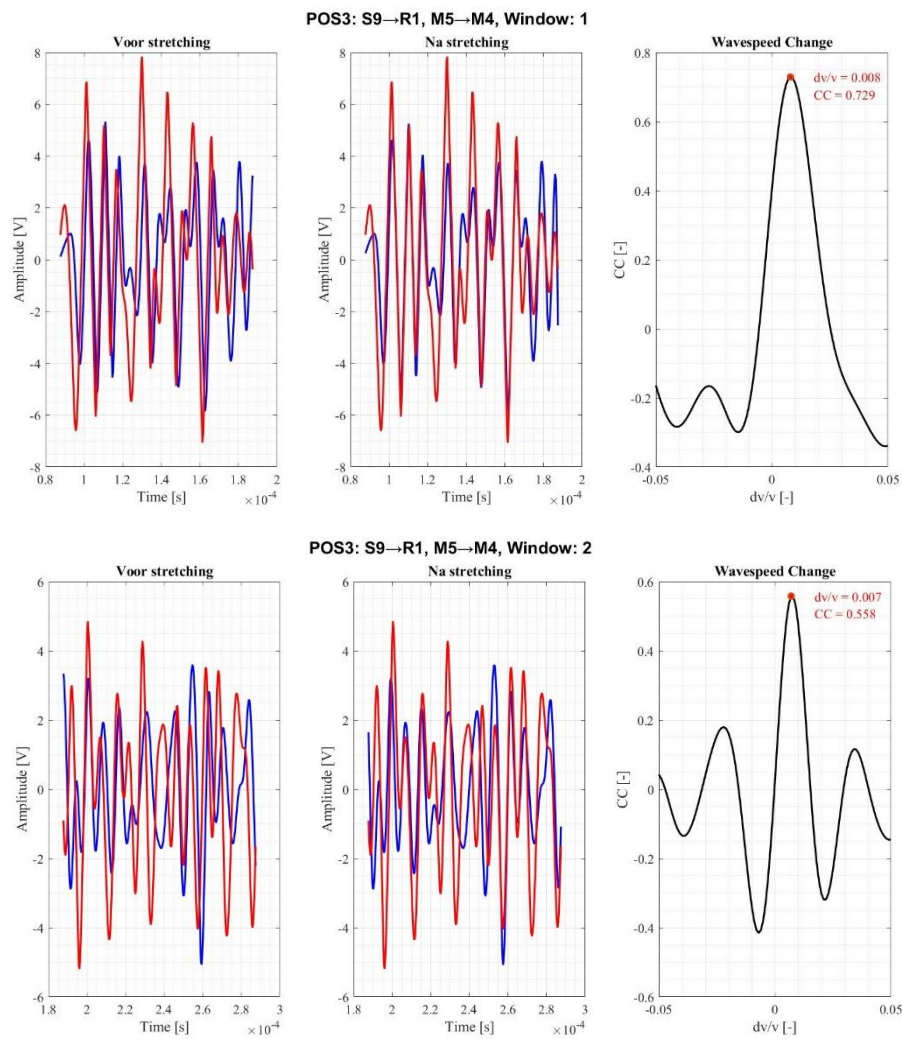
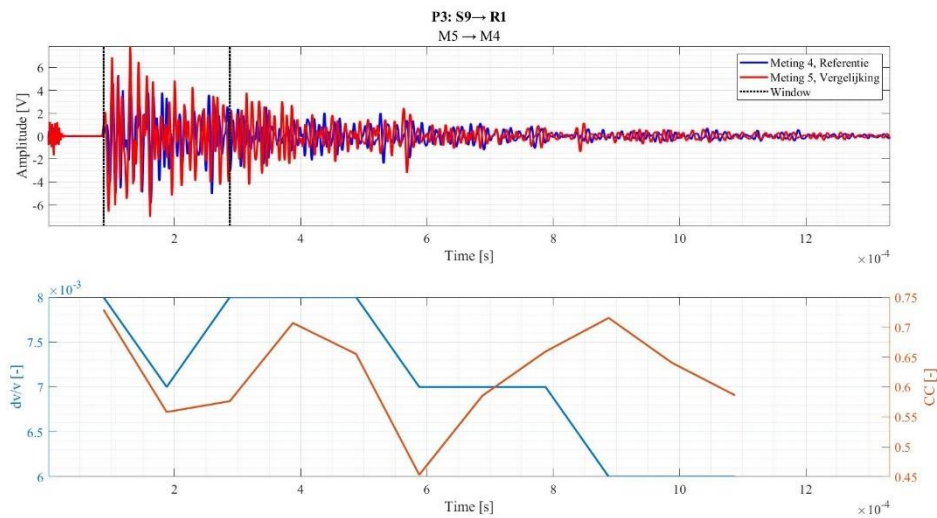
POS3: S9→R1, M4→M3, Window: 1



POS3: S9→R1, M5→M4, Window: 2

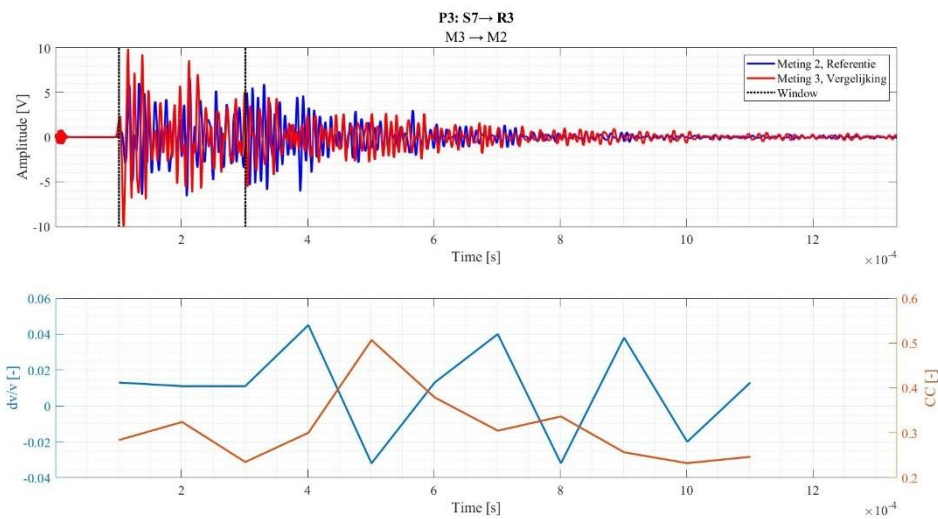


2.2.6 Sensorpaar 9-1, Meting 5->4

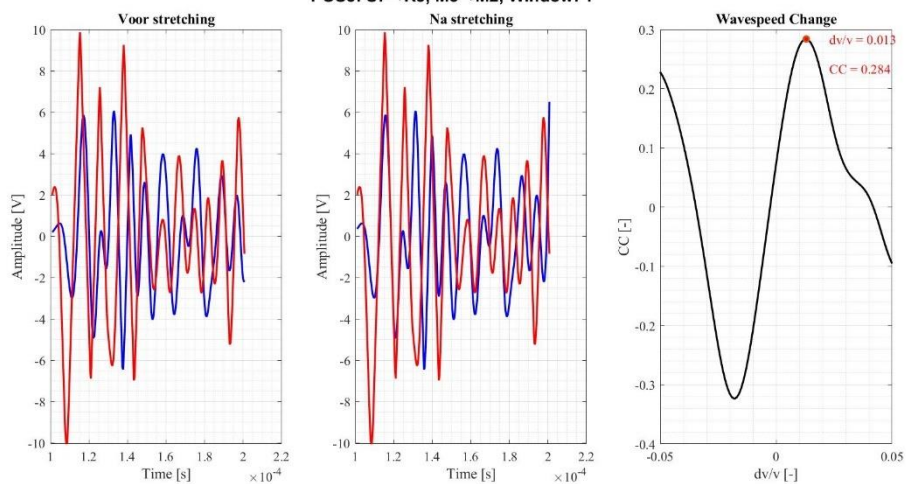


2.3 Sensorpaar 7 – 3 v.v.

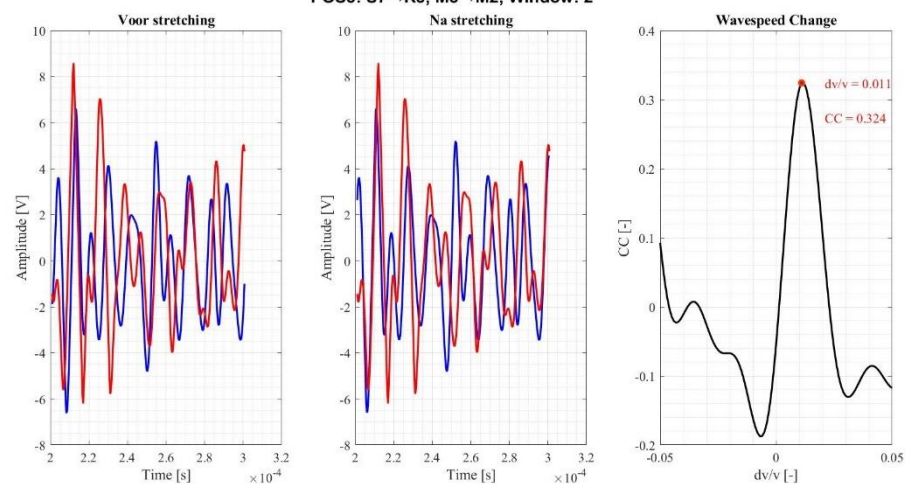
2.3.1 Sensorpaar 7-3, Meting 3->2



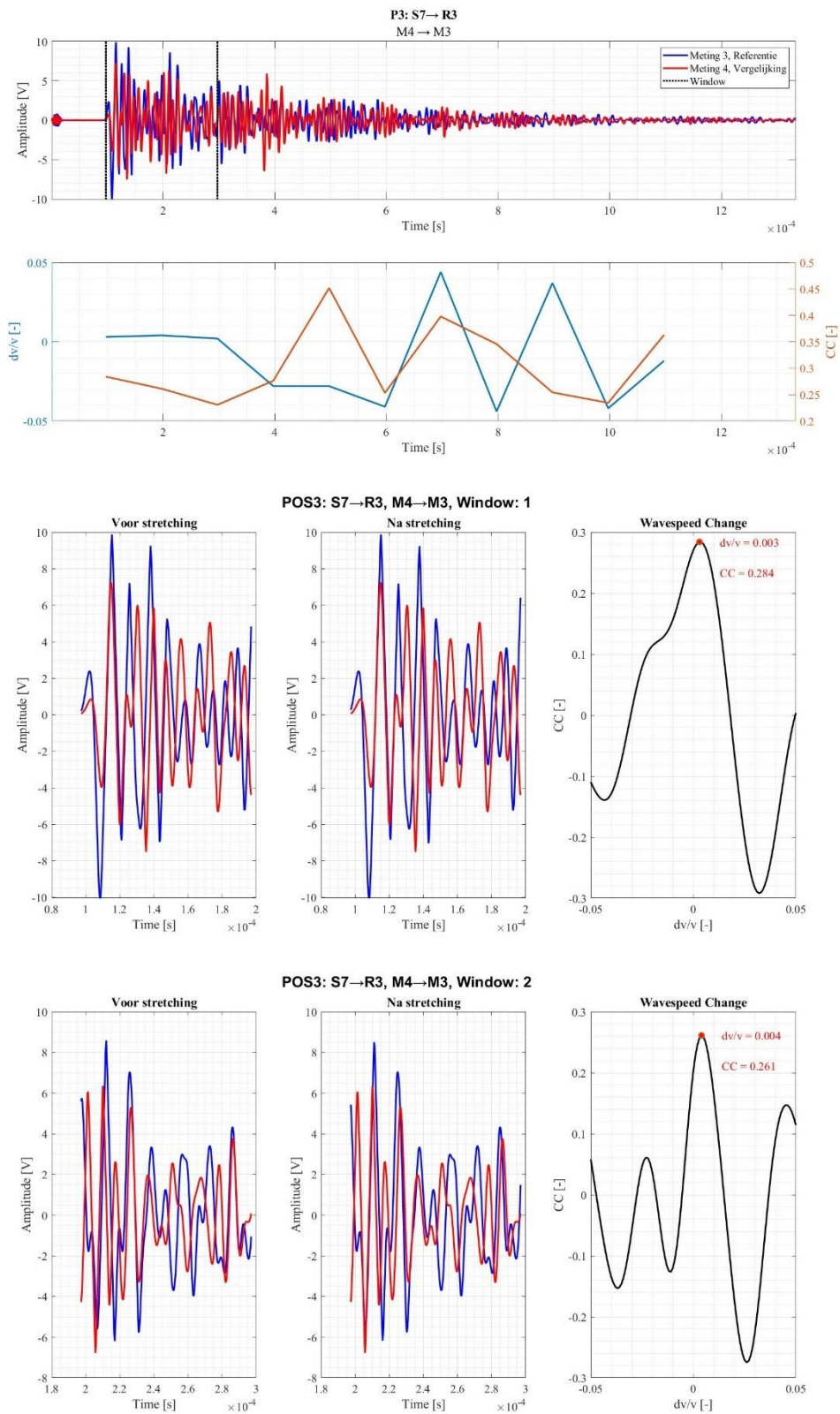
POS3: S7→R3, M3→M2, Window: 1



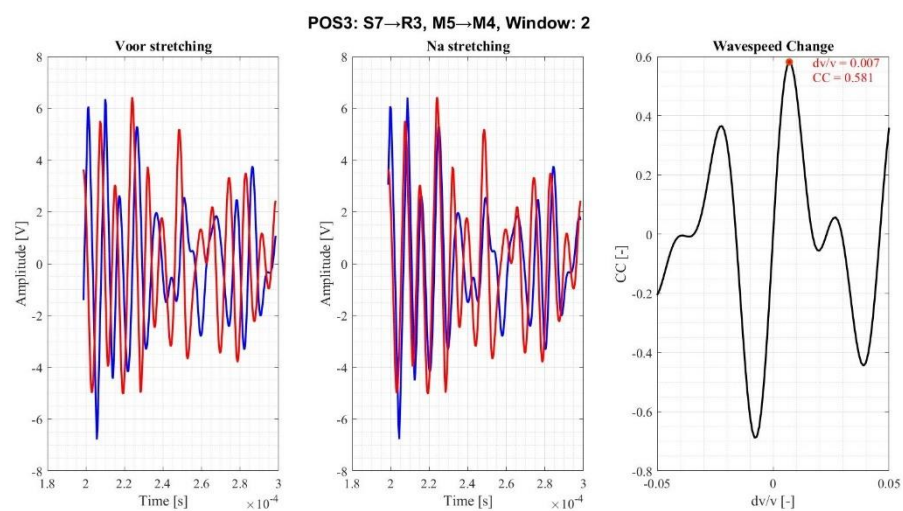
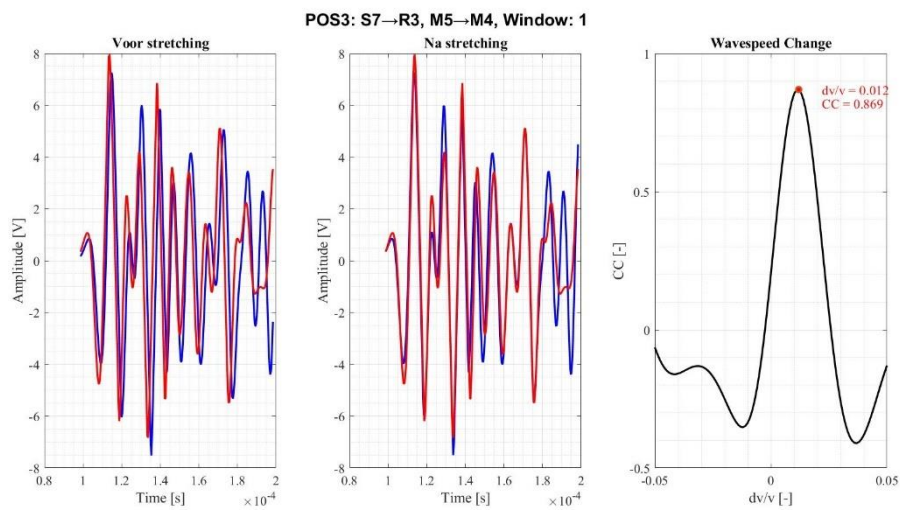
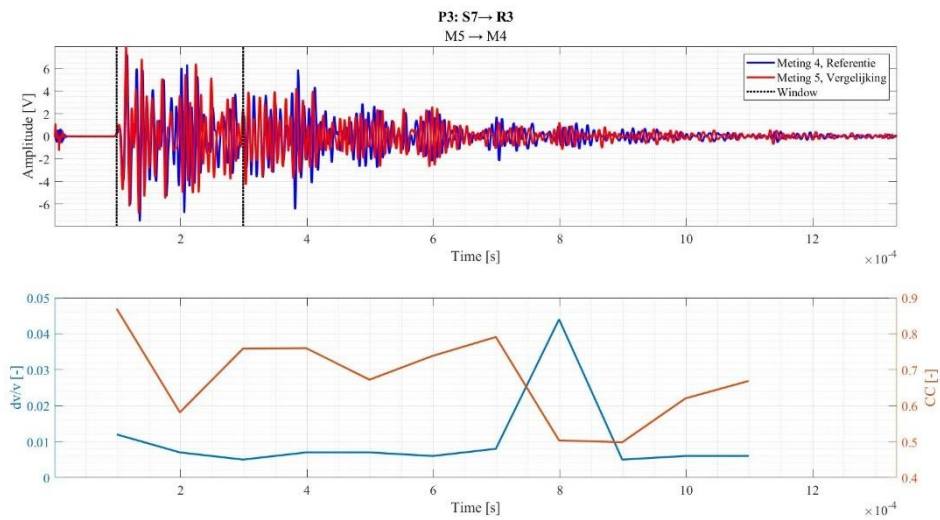
POS3: S7→R3, M3→M2, Window: 2



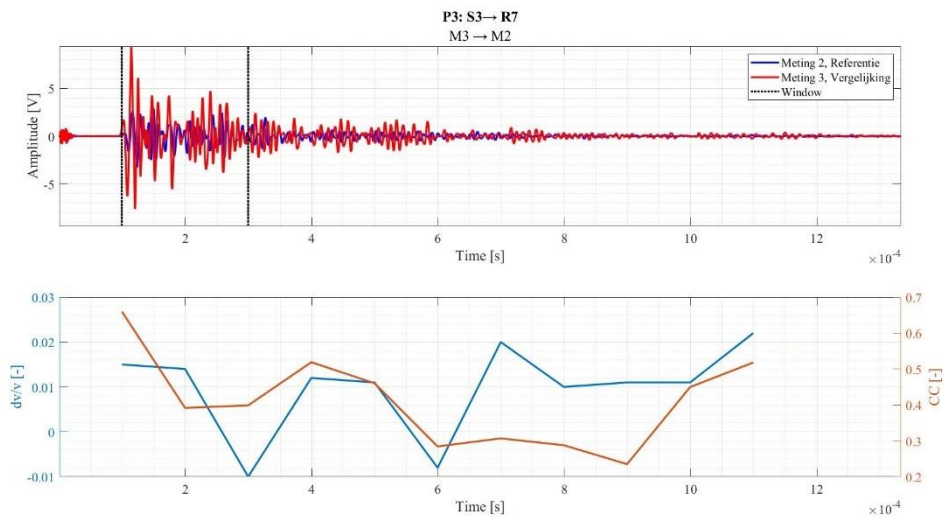
2.3.2 Sensorpaar 7-3, Meting 4->3



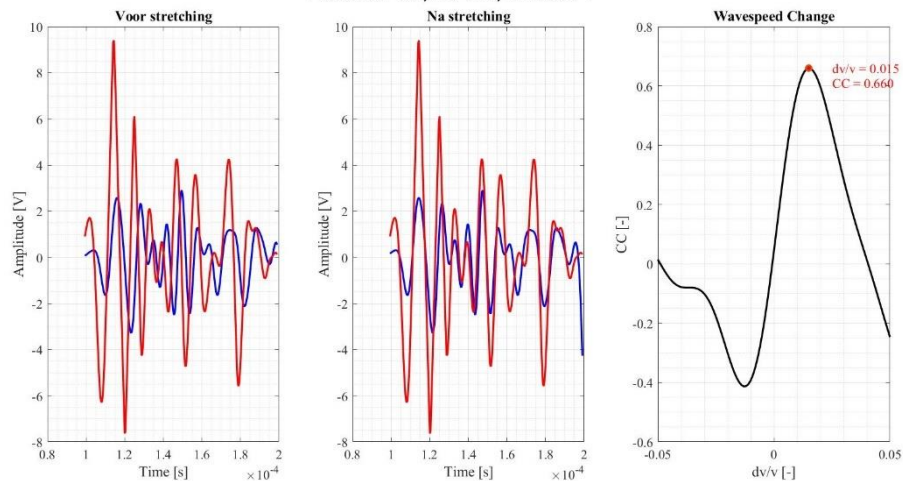
2.3.3 Sensorpaar 7-3, Meting 5->4



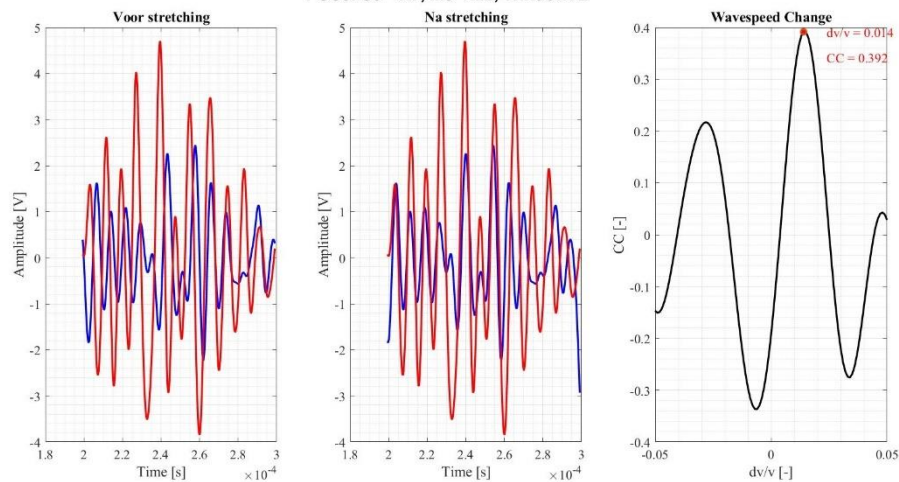
2.3.4 Sensorpaar 3-7, Meting 3->2



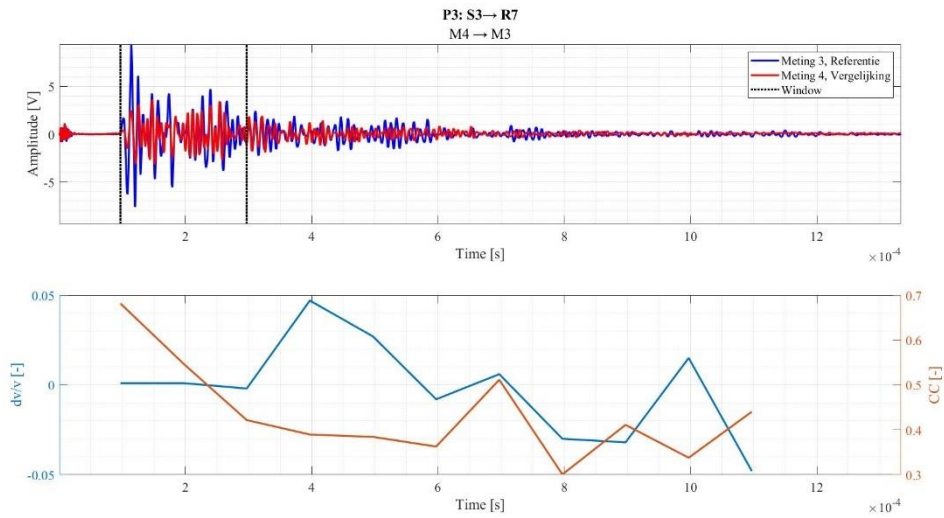
POS3: S3→R7, M3→M2, Window: 1



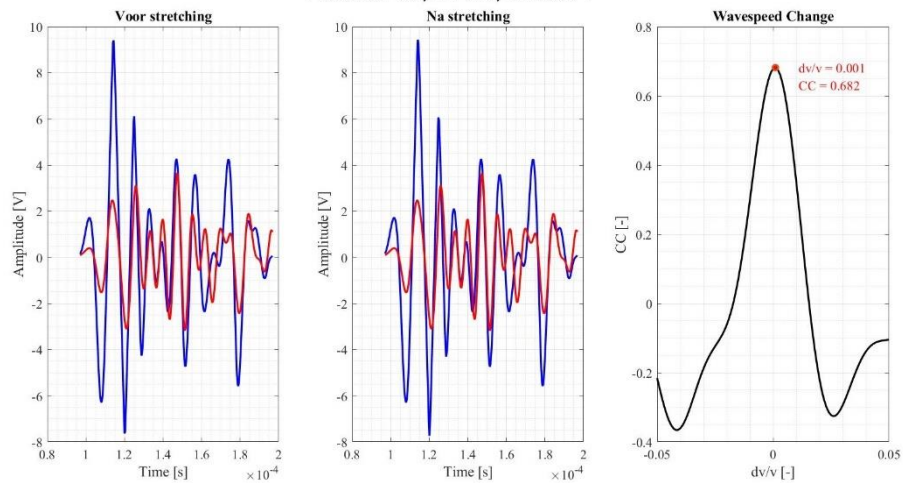
POS3: S3→R7, M3→M2, Window: 2



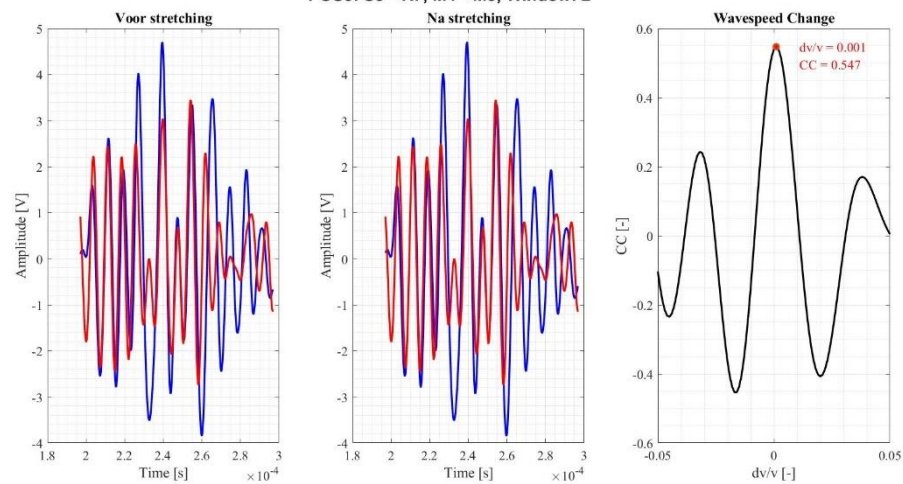
2.3.5 Sensorpaar 3-7, Meting 4->3



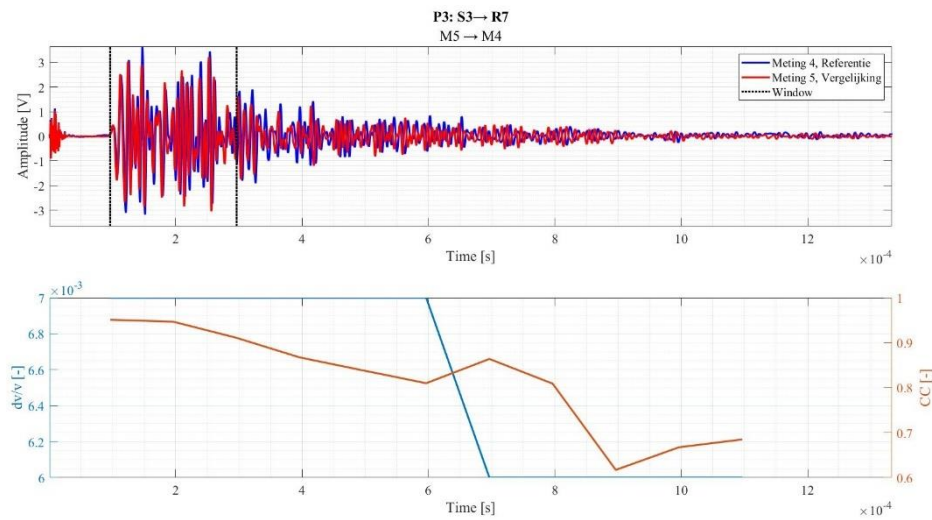
POS3: S3 → R7, M4 → M3, Window: 1



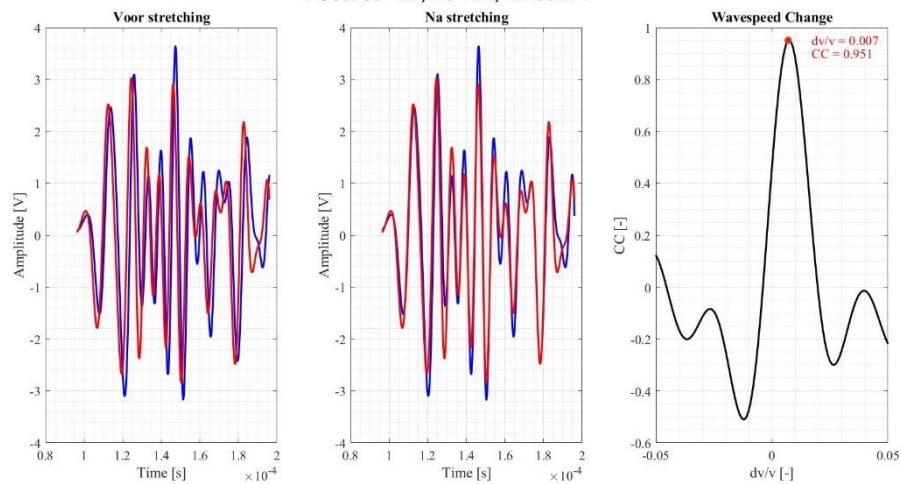
POS3: S3 → R7, M4 → M3, Window: 2



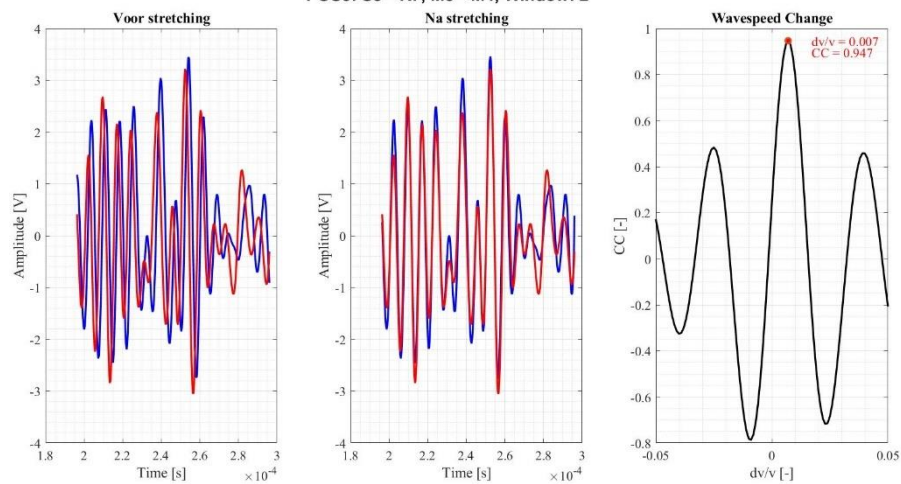
2.3.6 Sensorpaar 3-7, Meting 5->4



POS3: S3→R7, M5→M4, Window: 1

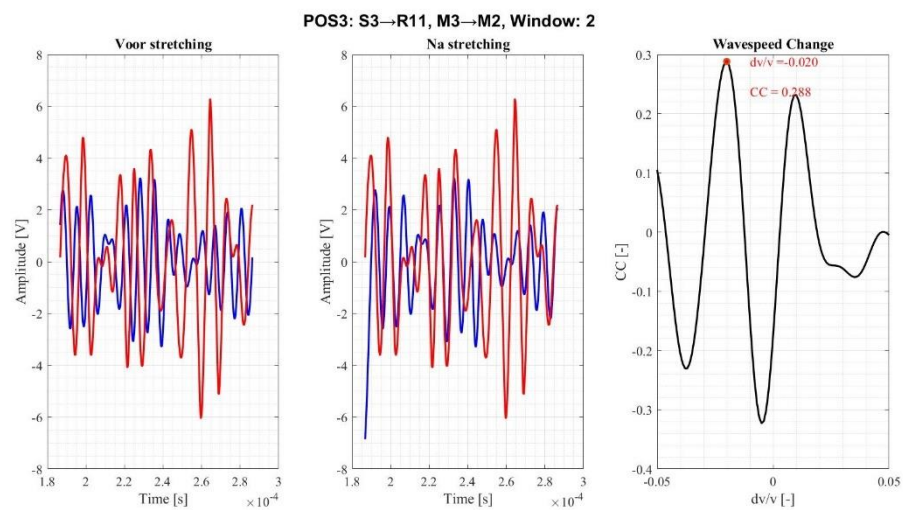
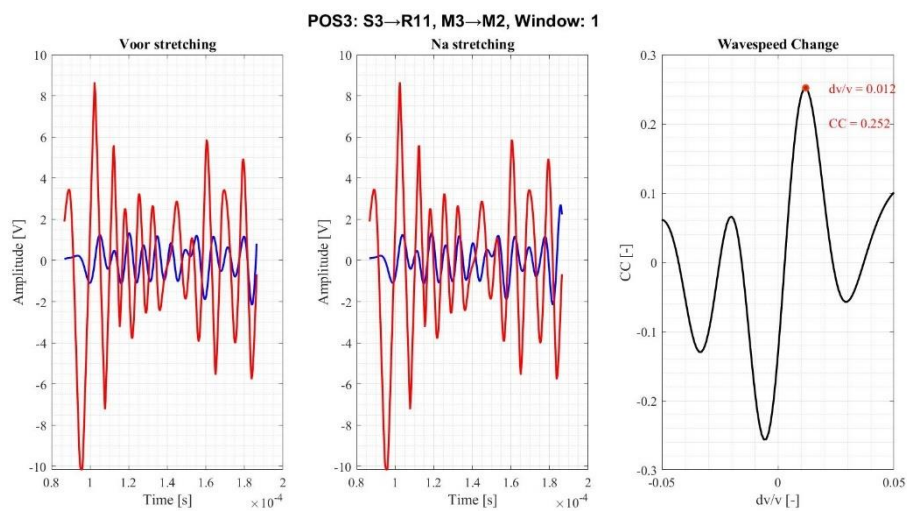
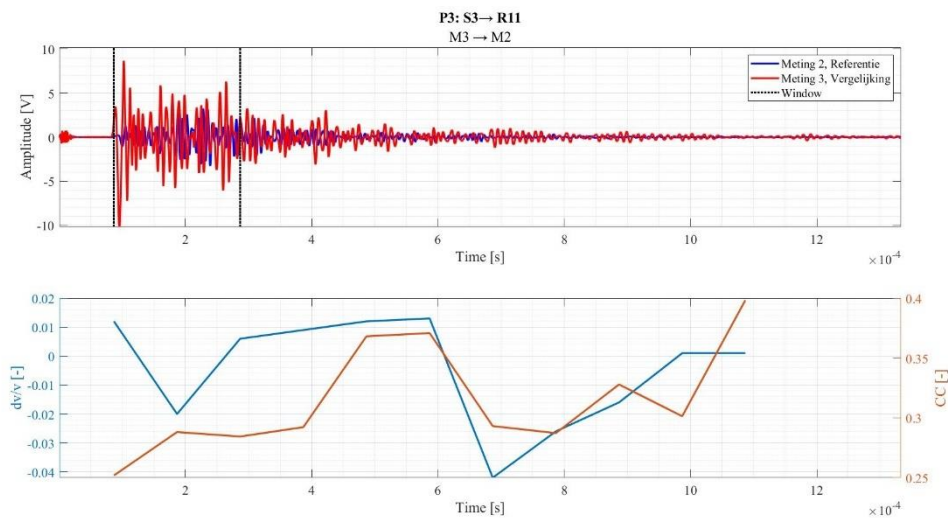


POS3: S3→R7, M5→M4, Window: 2

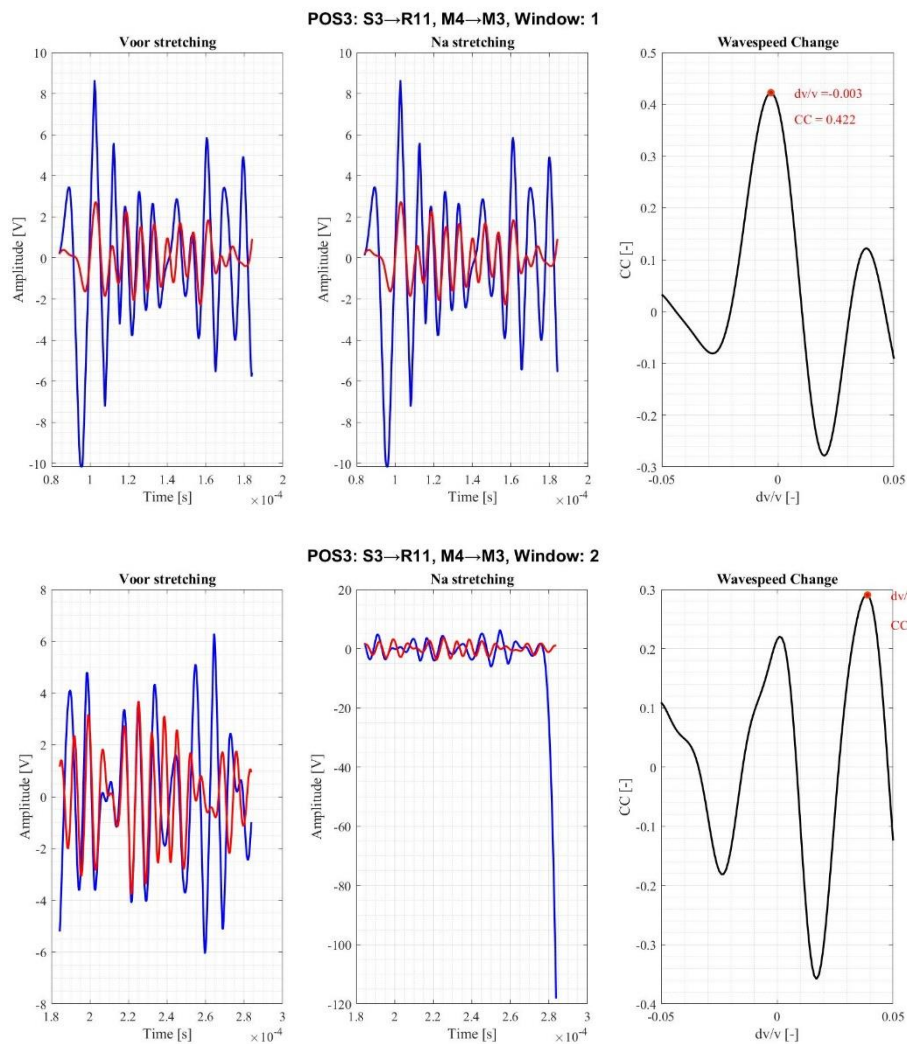
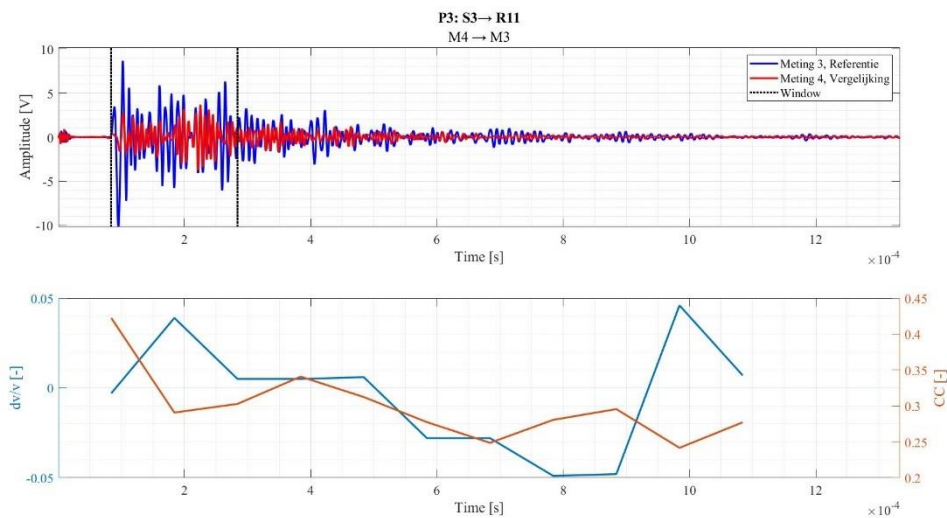


2.4 Sensorpaar 3 – 11 v.v.

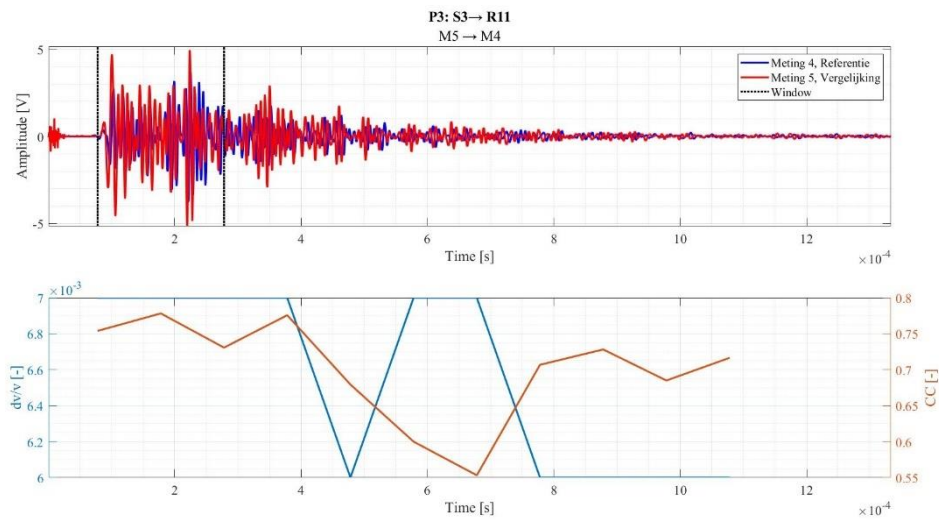
2.4.1 Sensorpaar 3-11, Meting 3->2



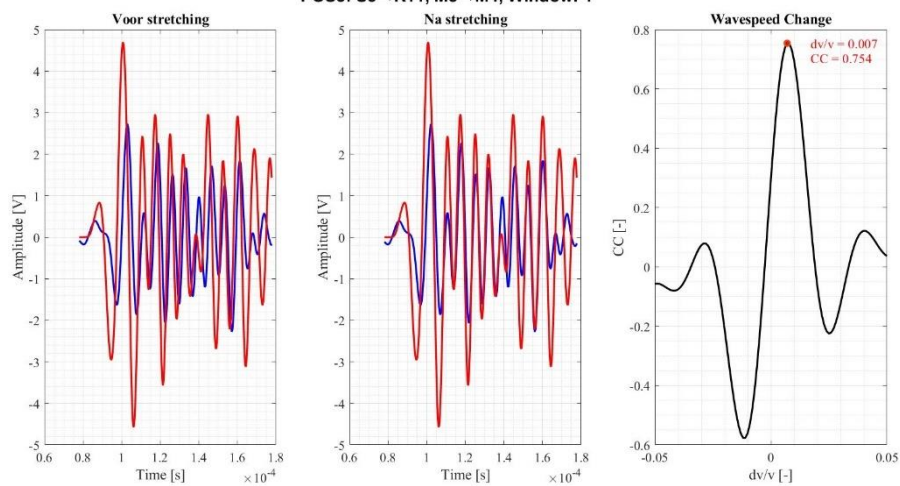
2.4.2 Sensorpaar 3-11, Meting 4->3



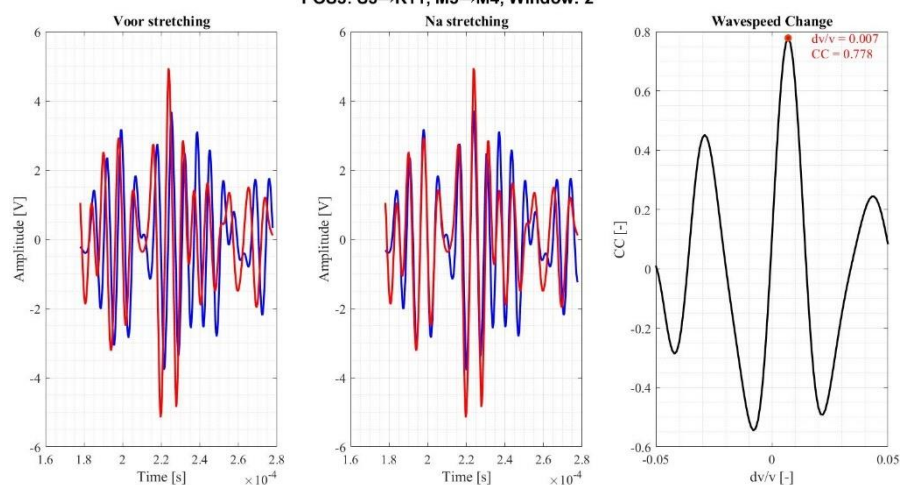
2.4.3 Sensorpaar 3-11, Meting 5-→4



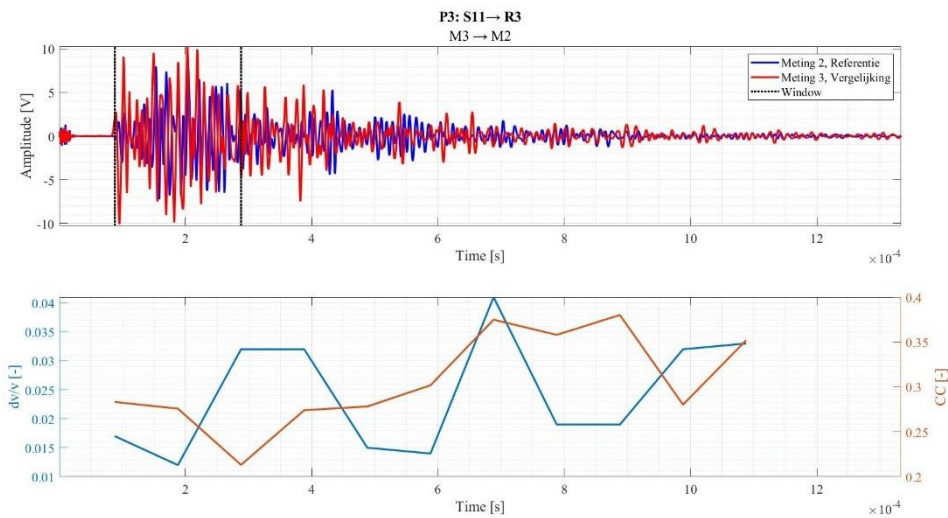
POS3: S3→R11, M5→M4, Window: 1



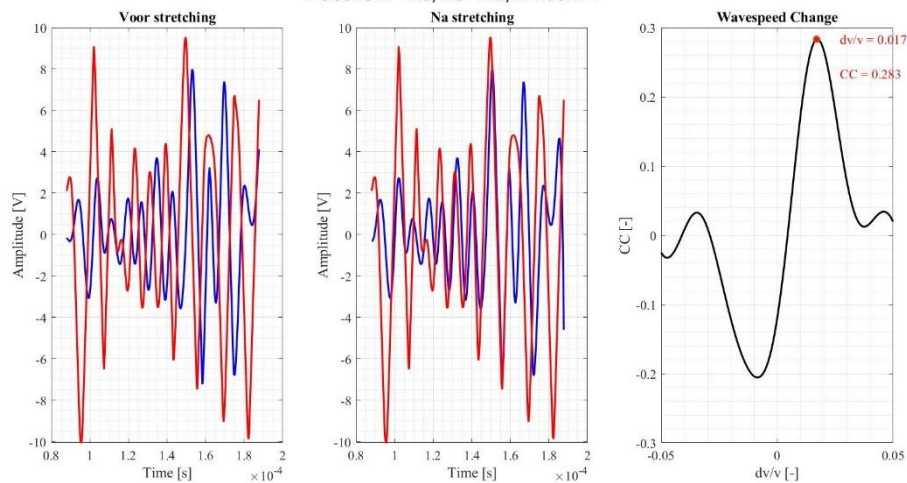
POS3: S3→R11, M5→M4, Window: 2



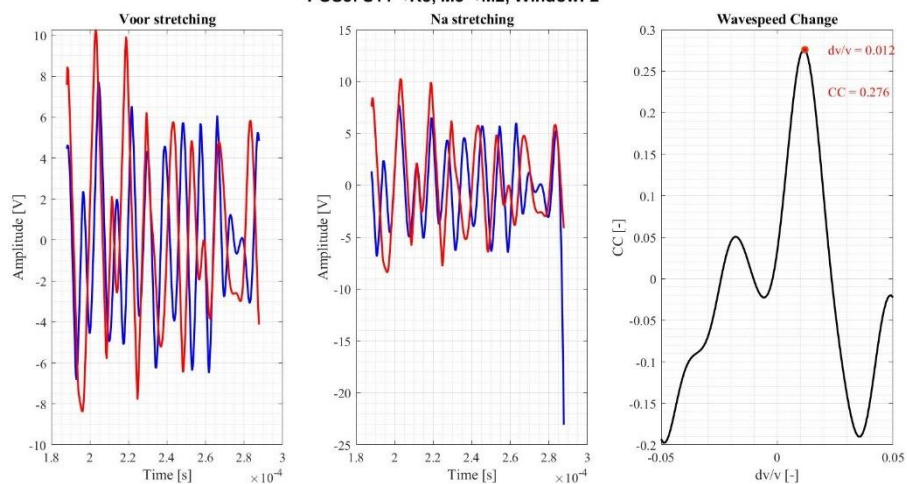
2.4.4 Sensorpaar 11-3, Meting 3->2



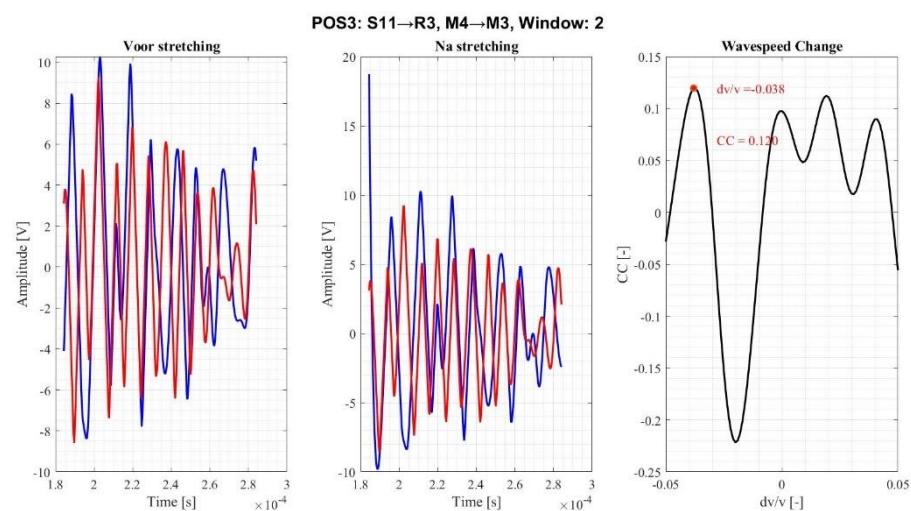
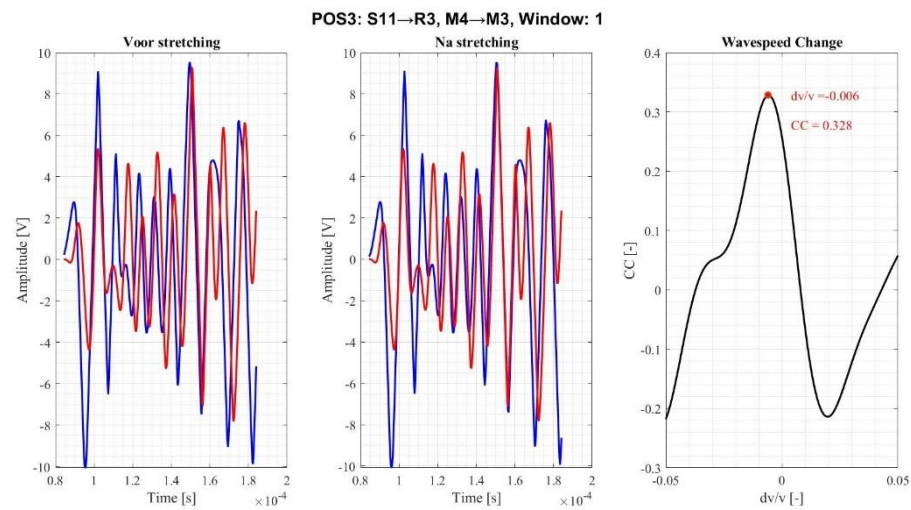
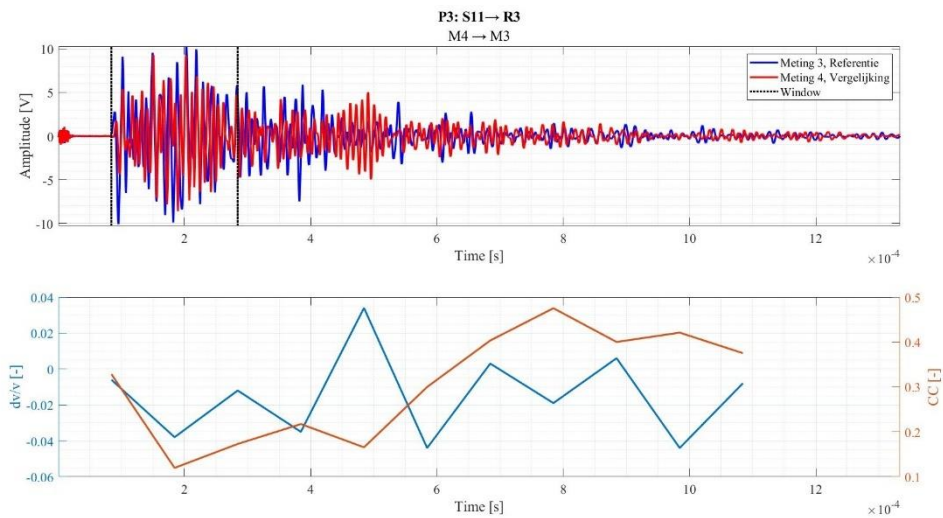
POS3: S11→R3, M3→M2, Window: 1



POS3: S11→R3, M3→M2, Window: 2



2.4.5 Sensorpaar 11-3, Meting 4->3



2.4.6 Sensorpaar 11-3, Meting 5->4

