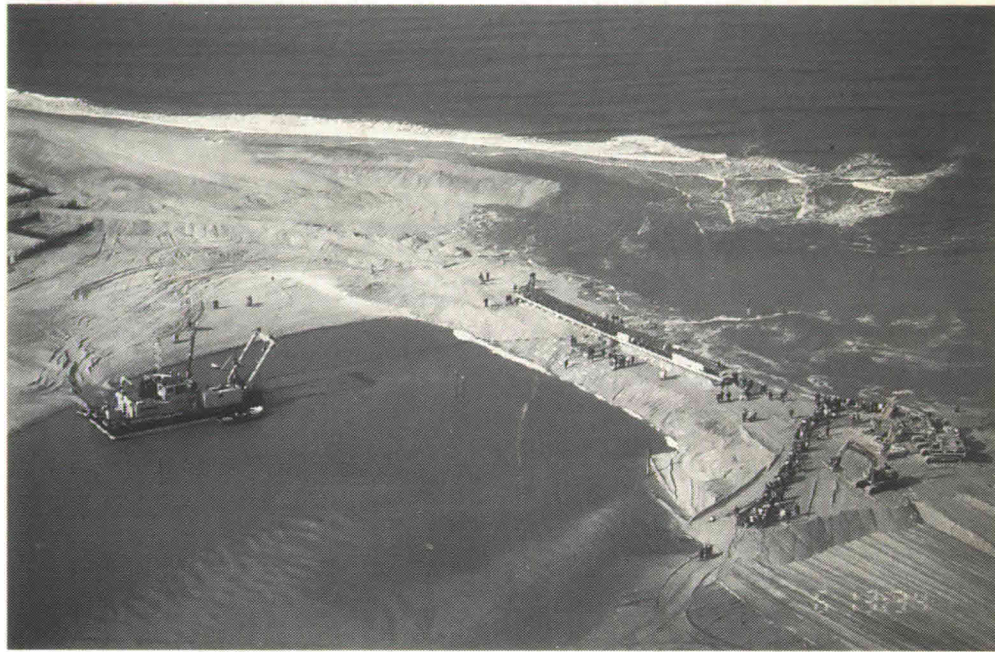


Vorbereiding van een bresgroeï-experiment in het Zwin 1994

Deel III: Laboratoriumproeven met de trillingsmeter

Augustus 1995

M.J. Smit / D.W. Snip



Voorbereiding van een bresgroei- experiment in het Zwin

6 en 7 oktober 1994

Deel III: Verslag van de laboratoriumproeven met de trillingsmeter

D.W. Snip
M.J. Smit

Afstudeercommissie:

Prof. ir. K. d'Angremond
ir. W.Th. Bakker (dagelijks begeleider)
Dr.ir. J. v/d Graaff
ir. P.J. Visser

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde

...
en in alle gewesten
wordt de stem van het water
met zijn eeuwige rampen
gevreest en gehoord

Marsman

Voorwoord

Wanneer in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica proeven worden uitgevoerd, is dat in verreweg de meeste gevallen om ondersteunende gegevens voor een theorie te verzamelen of om gegevens te verzamelen om een theorie mee uit te kunnen bouwen. Het in een opstelling bestuderen van een prototype of schaalmodel van een waterbouwkundig kunstwerk, waarvoor de grote golfbak ooit is gebouwd, gebeurt in aanzienlijk mindere mate. Het uittesten van nieuwe meetapparatuur of -methoden is een nog zeldzamer gebeurtenis in het laboratorium.

In augustus en september 1994 echter werden in twee goten naast elkaar nieuwe instrumenten uitgetest, twee instrumenten die beide experimenteel waren. In de eerste, zeer geavanceerde, opstelling van afstudeerder Erik Wiltink werd door een glasvezelkabel groen laserlicht via lenzen en spiegels in een vlak haaks op de goot door traag stromend water geleid. Kleine kunststof balletjes met een dichtheid gelijk aan die van water werden stroomopwaarts op de bodem losgelaten. Wanneer de balletjes het vlak van het 'laser-mes' doorkruisten lichtten ze even op. Met behulp van veel elektronische kennis en handigheid konden de video-opnamen van de lichtflitsen in het lasermes digitaal vertaald worden naar grootte en sterkte van in het water voorkomende wervels.

In de goot daarnaast werd een geheel ander soort instrument uitgetest, een instrument dat buiten in een echte dijk zou worden ingegraven. Bij het bezwijken van die dijk zou dat instrument de geometrie van de groeiende bres vast moeten leggen. De experimenten in deze goot waren op een totaal andere wijze (minder geavanceerd) opgezet. Allereerst bestond er de kans op een nat pak. Het uiterste werd hier getracht uit de goot en het pompsysteem te halen ten einde een watersnelheid zo dicht mogelijk 4 m/s te kunnen bereiken die later bij de dijkdoorbraak werd verwacht. In dat snel stromende water danste een doosje aan een eenvoudig touwtje. Gelukkig stonden er naast deze goot ook een computer en een digitale oscilloscoop op een veilige plek opgesteld. Toevallige voorbijgangers en dat waren over het algemeen eerste- of tweedejaars die hun ouders rond leidden of verdwaalde symposiumgangers, haalden bij het zien van de elektronica opgelucht adem, het ging hier dus duidelijk toch om wetenschappelijk onderzoek.

Het opzetten van de meetopstelling en het uitvoeren van de proeven moest in zeer korte tijd gebeuren. Het ging hier om een testopstelling voor een instrument waarvoor de voorbereidingstijd eigenlijk veel te kort was. Het prototype experiment met een bezwijkende dijk was al gepland, terwijl het instrument nog getest, aangepast en vervolgens in veelvoud geproduceerd moest worden. In dit krappe tijdschema moest door de afstudeerders Marion Smit en Wino Snip nog zeer veel geregeld worden.

In deze periode van gehaastheid en stress konden wij altijd rekenen op de medewerkers van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica. Hierbij willen wij graag de nadrukkelijke dank uitspreken voor de tijd die en het geduld dat met name Dhr. Groeneveld, de werkplaatsbeheerder, Dhr. Kalkman de elektrotechnicus en Dhr. van Duin de timmerman, hadden voor het werk dat wij te doen hadden in hun laboratorium. Ook Dhr. Fontijn de directeur van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica willen wij bedanken voor zijn hulp bij de opzet en uitvoering van de experimenten.

Dit rapport, vormt samen met het rapport 'deel I, theoretisch vooronderzoek' en 'deel II, praktisch vooronderzoek' een afsluiting van het afstuderen van Marion Smit en Wino Snip aan de Technische Universiteit te Delft, faculteit der Civiele Techniek, vakgroep Waterbouwkunde.

Het afstudeerwerk maakt deel uit van de studie naar bresgroei in zanddijken die wordt uitgevoerd voor Rijkswaterstaat door de BegeleidingsGroep BresGroei, BG², onderdeel van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, werkgroep C, "zandige kusten".

Marion Smit en Wino Snip hebben samen gewerkt aan de meetopstelling voor een dijkdoorbraak op prototype schaal die plaats heeft gevonden in de monding van het Zwin, een rest van wat ooit de zeearm naar Brugge was, op de grens tussen Nederland en België. Als voorbereidingen op dit experiment is een literatuurstudie verricht met bresgroei als onderwerp en is een meetopstelling ontworpen. Dit rapport, deel III van de serie 'Bresgroeiexperiment in het Zwin', heeft het ontwerp en het testen van een meetinstrument dat de geometrie van een groeiende bres in de tijd moet kunnen vastleggen tot onderwerp.

Wino Snip en Marion Smit
Delft, Januari 1995

Inhoudsopgave

Voorwoord	5
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
1.1 aanleiding en doelstelling	12
1.2 Programma van eisen	12
2 De meetopstelling van de laboratoriumproeven	14
2.1 Trillingsmeter	14
2.1.1 Het piëzo-elektrische elementje	14
2.1.2 De omhulling van het instrument	15
2.2 meetopstelling	16
3 Opzet en beschrijving van de testen	18
3.1 Inleiding	18
3.2 keuze van de sampletijd	18
4 Verwerking van de databestanden	20
4.1 Omzetten van de data naar een leesbaar bestand	20
4.2 Beschrijving van het dataverwerkingsprogramma	20
5 Resultaten	22
6 Simulatie dijkdoorbraak in 't Zwin op kleine schaal	24
7 Conclusie	25
Literatuurlijst	27

Bijlagen

Bijlage I: Listing van het dataverwerkingsprogramma	Bijlage I,1
Bijlage II: resultaten van de experimenten met de trillingsmeters	Bijlage II,1

Samenvatting

In opdracht van de Dienst Weg en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat en van de Technische Adviescommissie van de Waterkeringen werkgroep C, "Zandige Kusten" zijn door de Meetdienst Zeeland van Rijkswaterstaat, de Technische Universiteit Delft en het Waterloopkundig Laboratorium op 6 en 7 oktober 1994 twee dijkdoorbraakexperimenten op prototypeschaal uitgevoerd in getijdegebied het Zwin in Zeeuwsch-Vlaanderen. Doel van deze dijkdoorbraken was het verifiëren van de modellen die het bresgroeiproces beschrijven. Om een waterbouwkundig experiment op prototypeschaal mogelijk te maken is een gedegen voorbereiding noodzakelijk. Het experiment moet zowel theoretisch [5] als praktisch [4] goed voorbereid worden. Tevens is een goede voorbereiding van de meetopstelling belangrijk, een experiment is pas geslaagd wanneer goede metingen beschikbaar zijn gekomen.

In het kader van het afstuderen van Marion Smit en Wino Snip aan de TU-Delft, faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Waterbouwkunde wordt in dit verslag een serie experimenten beschreven waarin de bruikbaarheid van een trillingsmeter als dieptemeter (ten behoeve van het Zwin94 bresgroeperiment) wordt getoetst. Dit verslag is het derde deel van de serie 'Vorbereiding van een bresgroeperiment in het Zwin'. De andere delen zijn: het theoretische vooronderzoek (deel I) [5] en het praktische vooronderzoek (deel II) [4].

In dit verslag wordt een serie proeven met deze trillingsmeter beschreven, het doel hiervan is om de werking van het instrument in de extreme situatie van een doorbrekende dijk te kunnen voorspellen. Het verschil in amplitude tussen trillingen in een zandpakket (de dijk) en trillingen veroorzaakt door stromend water moet duidelijk te onderscheiden zijn wil de trillingsmeter voor het bresgroeperiment in 't Zwin bruikbaar zijn.

In hoofdstuk 1 wordt de aanleiding en doelstelling van het bresgroeperiment en het programma van eisen waaraan het meetinstrument moet voldoen beschreven. De dieptemetingen zijn van groot belang voor het slagen van de proef; het bresgroeperiment in het Zwin is geslaagd wanneer de in de eerste Zwinproef waargenomen overgang tussen dieptegroei en snelle breedtegroei verklaard en voor voorspelling gebruikt kan worden. Dit kan alleen gebeuren wanneer het verloop van de diepte in de tijd tijdens het experiment gemeten wordt.

Gebleken is dat het gebruik van bestaande meetmethoden als side-looking sonar en echolood-metingen vanwege de extreem hoge stroomsnelheden die (waarschijnlijk) zullen optreden (tot ca 4 m/s wordt verwacht), de snel variërende geometrie en de hoge sedimentconcentratie in het water uiterst twijfelachtig is. Om dieptemetingen toch mogelijk te maken is naar een alternatieve oplossing gezocht: de trillingsmeter. Het idee hierachter is dat trillingen in zand veroorzaakt door langs het zandpakket stromend water anders verlopen (amplitude, frequentie) dan trillingen in snel stromend water. Op discrete punten ingraven van trillingsmeters die op elk tijdstip aangeven of zij zich in

water dan wel in zand bevinden geeft een goede benadering van het diepteverloop in de tijd.

Hoofdstuk 2 geeft een beschrijving van de meetopstelling. In paragraaf 2.1 wordt de trillingsmeter beschreven. De trillingsmeter is opgebouwd uit een piëzo-elektrisch elementje dat aan één zijde is ingeklemd en is verbonden met de waterdichte omhulling.

Een trillingsmeter wordt (in zijn oorspronkelijke configuratie) onder andere toegepast in de beveiligingsindustrie om beweging te detecteren. Voor deze toepassing is in het instrument een drempelschakeling aanwezig om toevallige trillingen (bijvoorbeeld langsrijdend verkeer) te onderscheiden van een poging tot inbraak (bijvoorbeeld brekend glas). De trillingsmeter geeft in dat geval een aan-uit detectie (wel/geen belangrijke beweging). Een uitgebreide beschrijving van de modificaties aan het metertje ten behoeve van het experiment is in het verslag terug te vinden.

Tijdens de proeven wordt de trillingsmeter verbonden met een data-acquisitiesysteem dat de spanningen opgewekt door de trillingen van het instrument vastlegt. Het instrument hangt aan een touwtje in de goot. De snelheid van het water waarin de meter hangt wordt gemeten met behulp van een elektro-magnetische snelheidsmeter (EMS), deze is ook rechtstreeks verbonden met het data-acquisitiesysteem. In het laboratorium bleek een stroomsnelheid van maximaal 3.5 m/s te realiseren. Deze testen met de trillingsmeter worden in hoofdstuk 3 beschreven.

De data wordt door het data-acquisitiesysteem binair opgeslagen, niet zomaar oproepbaar als een ASCII bestand. Deze niet direct leesbare file moet eerst worden omgezet. Ten behoeve van de dataverwerking is een programma (PASCAL) geschreven. De data kan nu met behulp van een spreadsheet programma (Quattro PRO) op eenvoudige wijze grafisch weergegeven worden. In hoofdstuk 4 wordt dit beschreven. In hoofdstuk 5 wordt vervolgens het resultaat van de testen beschreven.

In hoofdstuk 6 wordt een dijkdoorbraakexperiment op schaal beschreven. Hierbij wordt de werking (het onderscheidend vermogen) van de trillingsmeter getoetst.

Uit deze serie experimenten kan worden geconcludeerd (hoofdstuk 7) dat de trillingsmeter geschikt is om de overgang tussen zand en water te detecteren. De trillingsmeter zal tijdens de tweede bresgroeiproef in het Zwin gebruikt kunnen worden gebruikt als dieptemeter.

1 Inleiding

Nederland ligt voor een groot deel beneden zeeniveau; voor de inwoners is een goede kustverdediging dan ook van levensbelang. Naar de veiligheid van de kustverdedigingswerken wordt veel onderzoek gedaan, waar nodig worden maatregelen getroffen zoals zandsuppleties, dijkverhogingen en de aanleg van strandhoofden.

De watersnoodramp van 1953 heeft grote gevolgen gehad voor de ontwikkeling en aanleg van de kustverdedigingswerken. De enorme angst voor herhaling leidde tot de acceptatie van nieuwe grootschalige kustverdedigingswerken. Hierdoor kwam ook vanuit de politiek veel geld beschikbaar.

De laatste jaren is een andere tendens zichtbaar: men begint zich af te vragen of nieuwe beschermingsmaatregelen wel zo noodzakelijk zijn. De discussies over de noodzaak van deze beschermingsmaatregelen, die bijvoorbeeld ontstonden bij recente grootschalige dijkverhogingsprojecten zijn hiervan een goed voorbeeld. De ingrepen in huishoudens en het landschap worden vaak te groot gevonden en er komt dus steeds minder geld beschikbaar.

Het onderzoek naar de stroomgatontwikkeling tijdens dijkdoorbraak ligt echter niet stil. De dijkdoorbraken in het Zwin op 6 en 7 oktober 1994 maken deel uit van dit onderzoek naar bresgroei dat door de BegeleidingsGroep BresGroei (BG²), onderdeel van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen afdeling C, zandige kusten, uit wordt gevoerd.

Dit verslag vormt deel III van de serie 'Vorbereiding van een bresgroeiexperiment in het Zwin', deel I omvat een theoretische vooronderzoek en deel II een praktisch vooronderzoek voor het Zwin94 experiment.

In dit verslag wordt een serie experimenten beschreven waarin de bruikbaarheid van een trillingsmeter als dieptemeter (ten behoeve van het Zwin94 bresgroeiexperiment) wordt getoetst.

De dieptemetingen zijn van essentieel belang voor het slagen van de proef. In het werkplan waarin de eerste opzet van de dijkdoorbraak behandeld wordt, wordt het slagen van de proef als volgt gedefinieerd: het bresgroeiexperiment in het Zwin is geslaagd wanneer de in de eerste Zwinproef waargenomen overgang tussen langzame en snelle breedtegroei verklaard en voor voorspelling gebruikt kan worden. Er wordt verwacht dat het tijdstip van deze overgang mede veroorzaakt wordt door een koppeling tussen de breedte- en de dieptegroei van de bres. Toetsen aan deze verwachting kan wanneer het verloop van de diepte in de tijd bekend is.

De in dit verslag beschreven (laboratorium) experimenten zijn in juni 1994 uitgevoerd, enige maanden voor de bresgroeioproef in het Zwin. Het verslag is direct na afloop van de experimenten geschreven (dus voor de proef), dit verklaart de toekomstige tijd waarin het geschreven is.

Gebleken is dat het gebruik van bestaande meetmethoden als side looking sonar en echolood-metingen [4] vanwege de extreem hoge stroomsnelheden die (waarschijnlijk)

zullen optreden (tot zo'n 4 m/s wordt verwacht) [2] [3], de snel variërende geometrie en de hoge sedimentconcentratie in het water uiterst twijfelachtig is. Om dieptemetingen toch mogelijk te maken is naar een alternatieve oplossing gezocht; de trillingsmeter. Het idee hierachter is dat trillingen in zand veroorzaakt door langs het zandpakket stromend water anders verlopen (amplitude, frequentie) dan trillingen in snel stromend water. Op discrete punten ingraven van trillingsmeters die op elk tijdstip aangeven of zij zich in water dan wel in zand bevinden geeft een goede benadering van het diepteverloop van de bres in de tijd.

De nauwkeurigheid die kan worden bereikt hangt af van de onderlinge afstand van de trillingsmeters.

De beschikbare tijd waarin een meetmethode moest worden bedacht, ontworpen en getest moest worden ontworpen was gering, dit is van invloed geweest op het uiteindelijke ontwerp.

In dit rapport wordt achtereenvolgens de aanleiding en de doelstelling, de meetopstelling, de testen in het laboratorium en de verwerking van de databestanden beschreven. Een van de testen was een schaalproef van het uit te voeren Zwinexperiment teneinde de werking van het instrument te toetsen. Het resultaat van zowel de proeven in het laboratorium, als het experiment met een dijk op schaal uitgevoerd in 't Zwin, geeft uiteindelijk de toepasbaarheid van de trillingsmeter aan.

1.1 aanleiding en doelstelling

Nadat uit uitvoerig overleg met (meet)deskundigen (Waterloopkundig Laboratorium in Delft, diverse meetdiensten van Rijkswaterstaat) bleek dat bestaande meetmethoden bij extreme omstandigheden zoals het Zwin94 experiment niet bruikbaar zijn, is gezocht naar een alternatief voor bestaande methoden om de diepte te meten. Van deze alternatieven (beschreven in deel II, praktische voorbereidingen van een dijkdoorbraakexperiment) leek de trillingsmeter op het eerste gezicht het best toepasbaar.

Het doel van dit testprogramma is om de werking van het instrument in de extreme situatie van een doorbrekende dijk te kunnen voorspellen. Het verschil in amplitude tussen trillingen in een zandpakket (de dijk) en trillingen veroorzaakt door stromend water moet duidelijk zichtbaar zijn wil de trillingsmeter voor het bresgroeixperiment in 't Zwin bruikbaar zijn.

1.2 Programma van eisen

De eisen waaraan het meetinstrument moet voldoen zijn globaal gezien opdeelbaar in twee soorten. Het instrument moet in de eerste plaats goede bruikbare metingen verrichten. Ten tweede moet het bestand zijn tegen de extreme omstandigheden die zich tijdens het experiment zullen voordoen.

- (1) Eisen met betrekking tot de meetresultaten:
 - duidelijk onderscheid aangeven tussen de trillingen veroorzaakt door stromend water en de trillingen in het zandpakket (superkritisch langsstromend water kan enorme trillingen veroorzaken).
 - goede meetsignalen afgeven onafhankelijk van de lengte van het snoer dat meetinstrument en de computer verbindt. (tijdens de proef wordt deze lengte naar verwachting maximaal 120 meter)
- (2) Eisen met betrekking tot de omstandigheden tijdens de meting:
 - voldoende stevig zijn; het doosje dat om het instrument is gebouwd wordt moet een druk van 1 kgf/cm^2 kunnen weerstaan, dit is de druk die door een bulldozer maximaal op de ondergrond afgegeven wordt. Ook het gewicht van bovenliggende zandlagen moet opgevangen kunnen worden.
 - bestand zijn tegen zout water.
 - volledig waterdicht zijn vanaf het moment dat het (in het zand) aangebracht is tot aan het einde van de proef.

2 De meetopstelling van de laboratoriumproeven

In dit hoofdstuk wordt de meetopstelling van de laboratoriumproeven beschreven. De configuratie van de trillingsmeter wordt in paragraaf 2.1 beschreven. De omhulling en de inhoud van het instrument worden los van elkaar behandeld. Paragraaf 2.1.1 beschrijft de aanpassingen aan het piëzo-elektrisch elementje. In paragraaf 2.1.2 wordt de beschermende omhulling van het instrument beschreven. In paragraaf 2.2 wordt het overige deel van de meetopstelling behandeld.

2.1 Trillingsmeter

De trillingsmeter bestaat uit twee belangrijke onderdelen. Het piëzo-elektrisch elementje meet de trillingen, de omhulling hiervan "het doosje" beschermt het elementje tegen ongewenste invloeden van buiten. In deze paragraaf worden deze twee functies beschreven.

2.1.1 Het piëzo-elektrische elementje

De trillingsmeter met een piëzo-elektrisch elementje wordt onder andere toegepast in de beveiligingsindustrie om beweging te detecteren. In het instrument is in dat geval een drempelschakeling aanwezig om toevallige trillingen (bijvoorbeeld langsrijdend verkeer) te onderscheiden van een poging tot inbraak (bijvoorbeeld brekend glas). De trillingsmeter geeft in dat geval een aan-uit detectie (wel/geen belangrijke beweging). Aangezien er voor aanvang van de proef niets bekend is over grootte en frequentie van trillingen in water en die in zand is besloten om ten behoeve van de tweede Zwinproef deze drempelschakeling weg te laten en het oorspronkelijke signaal door te geven. Hiermee wordt voorkomen dat, door een verkeerde instelling van de grootte van de drempel, mogelijk belangrijke signalen weggedrukt worden. Dit gebeurt wanneer de spanningen die door de trillingen worden opgewekt niet boven het niveau van de drempel uitkomen. Een tweede voordeel hiervan is dat op deze wijze elke trilling van het doosje kan worden waargenomen, waardoor een onderscheid tussen kleine trillingen en hard in de stroom klapperen waarneembaar wordt.

De trillingsmeter is opgebouwd uit een piëzo-elektrisch elementje dat aan één zijde is ingeklemd, dit geheel zit vast aan de waterdichte omhulling, zie Figuur 1.1. Het elementje bestaat uit een dun rond plaatje messing met een doorsnede van 25 mm waarop een dun rond laagje piëzo-elektrisch materiaal met een doorsnede van 20 mm is aangebracht. Op het piëzo-elektrisch materiaal is een dun laagje aluminium aangebracht. Als gevolg van een vervorming van het element ontstaat tussen de boven en de onderzijde van het elementje een spanningsverschil.

Aan de andere zijde (onderzijde) is op het elementje een gewichtje gesoldeerd of een stalen (druk)veertje met een gewichtje aan het andere uiteinde. Voor het gewichtje is een metalen boutje genomen. De gevoeligheid van het oorspronkelijke beveiligingsmetertje is te groot voor de gewenste toepassing. Door het slappe veertje van het beveiligings-elementje te vervangen door een bout met eventueel een stijvere veer kan de gevoeligheid worden verkleind en daarmee het bereik vergroot.

Wanneer het elementje bij de inklemming vast wordt gehouden en heen en weer wordt bewogen zal het boutje aan de andere zijde van het elementje door de massa traagheid ervan het elementje doen vervormen. Bij belasting in schokvorm zal het boutje gaan trillen. De frequentie van die trilling, een Eigenfrequentie, wordt bepaald door de veerstijfheid van het elementje en het mogelijke veertje enerzijds en de massa van het boutje anderzijds. Voor de proeven in het laboratorium zijn verschillende bout-veer configuraties uitgetest.

Bij het toegepaste elementje kon dit spanningsverschil tussen de +3 en -3 volt variëren, afhankelijk van de mate van vervorming.

2.1.2 De omhulling van het instrument

De omhulling van het elementje is in twee vormen gemaakt. Voor de proeven in het laboratorium was behoefte aan een doosje dat eenvoudig te openen en te sluiten zou zijn waardoor de samenstelling van het element (de inhoud) op eenvoudige wijze gewisseld zou kon worden. Voor het uiteindelijke instrument was dit laatste niet noodzakelijk. Sterkte was daarbij meer een vereiste. Bovendien moesten van het instrument 70 exemplaren gemaakt worden, zodat ook een eenvoudige uitvoering van het instrument in praktische zin van belang was.

Voor de laboratorium proeven is een standaard metalen doosje van 30x40x90 mm gebruikt. Het doosje kan afgesloten worden met een plaatje en vier schroeven aan een zijde. Een plaatje rubber zorgt voor een waterdichte afsluiting. Door de wand van het doosje is een hol boutje gedraaid waardoor een meetkabel naar het elementje wordt gevoerd. De ruimte tussen het boutje en de meetkabel is met kunsthars opgevuld. Aan de buitenzijde van het doosje is een haak aangebracht waaraan een touw kon worden geknoopt. Aan dit touw kan het doosje worden vastgehouden wanneer het in stromend water wordt gehouden.

Voor de instrumenten die uiteindelijk bij de dijkdoorbraakproef zijn gebruikt is een doosje van PVC gemaakt, zie Figuur 1.1. Een pijpje van 160 mm lang, een buitendiameter van 50 mm en een wanddikte van 4 mm vormt de basis van de omhulling. Aan beide zijden is het pijpje met een kap uit PVC, hoog 40 mm, afgesloten. Aan de binnenzijde van één van de kappen is een PVC staafje van 10 mm dik bevestigd. Dit staafje heeft zijn hartlijn op de hartlijn van de kap en steekt 10 mm aan de open zijde van de kap uit. Aan deze zijde is een gleufje in het staafje gezaagd. Haaks hierop is een gaatje geboord waarin M2 draad is getapt. Het elementje wordt eerst in het gleufje gestoken, daarna wordt in het gaatje een boutje gedraaid dat het

elementje in het gleufje vastklemt. Daarna wordt het elementje met secondenlijm vastgezet.

In de gesloten zijde van de kap zit een opening waardoor de meetkabel (coaxkabel type RG 58) naar binnen gevoerd wordt. In dit gaatje is een wartel van 25 mm lang geplaatst waarin een rubber ring zit. Door de wartel aan te draaien wordt deze ring platgedrukt en sluit daardoor de vrije ruimte tussen de ring en de meetkabel, die er doorheen loopt, af. Kit wordt als extra afsluiting in de wartel gespoten. Aan de binnenzijde van de kap zit om de meetkabel een "tie-rape" die als trekontlasting dienst doet. Van het elementje lopen dunne stroomdraadjes naar het uiteinde van de coax-meetkabel toe. Deze draadjes zijn aan de meetkabel vast gesoldeerd waarna de contactoppervlakjes met krimpkousjes worden geïsoleerd.

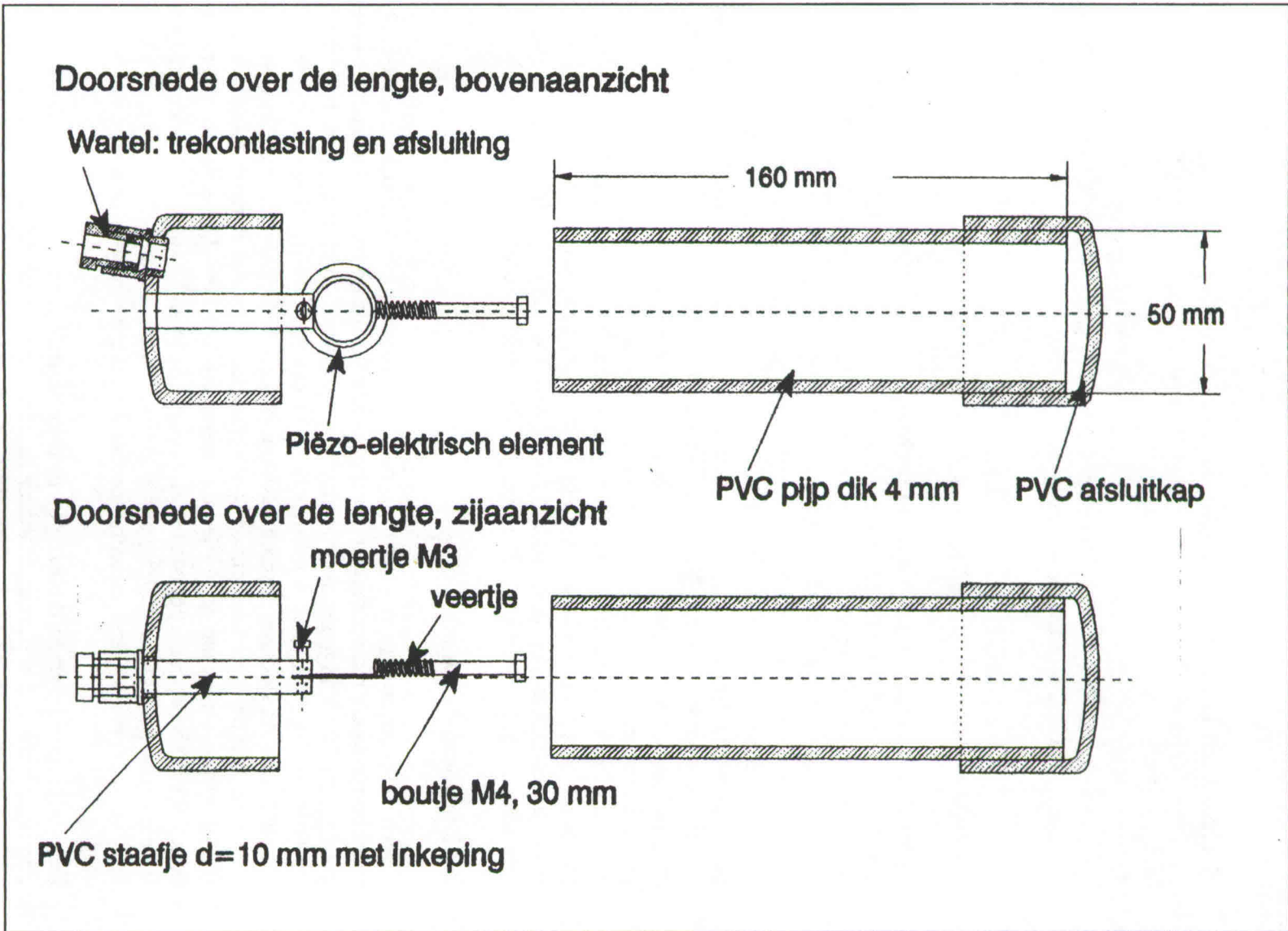
2.2 meetopstelling

De trillingsmeter is verbonden met een data-acquisitiesysteem dat de spanningen opgewekt door de trillingen van het instrument vastlegt. Tijdens de laboratoriumproeven hangt het instrument aan een touwtje in de goot. De watersnelheid wordt gemeten met behulp van een elektro-magnetische snelheidsmeter (EMS), die ook rechtstreeks verbonden is met het data-acquisitiesysteem.

Het data-acquisitiesysteem heeft meerdere ingangen, het bereik van de kanalen is instelbaar. Het is echter niet mogelijk om het bereik van de ingangskanalen los van elkaar te variëren. Tijdens de proeven moet het signaal van de trillingsmeter zo goed mogelijk worden weergegeven. Het meetbereik van de trillingsmeter is ± 2.5 volt, dit is tevens de waarde waarop het ingangskanaal moet worden ingesteld. Er ontstaan echter problemen wanneer tevens de EMS met een ingangskanaal wordt verbonden. Het signaal van een EMS varieert tussen ± 10 volt. Wanneer de beide signalen tegelijkertijd met de zelfde data-acquisitiekaart ingewonnen worden zal het signaal van de EMS verzwakt moeten worden. Dit is bereikt door een regelbare weerstand op de ingang te solderen.

Voor de metingen zijn zes verschillende configuraties van het piëzo-elektrische elementje gemaakt. Het verschil tussen deze elementjes wordt bepaald door zowel de afmetingen van de bout (de dikte en de lengte) als de verbindingsmethode (de eerste twee meters zijn direct op het element gesoldeerd, de andere vier zijn via een veer met het element verbonden). Vooraf is met behulp van een digitale-oscilloscoop de Eigenfrequentie en de dempingstijd bepaald. Met elke configuratie van de trillingsmeter zijn 3 laboratoriumproeven uitgevoerd. De resultaten hiervan staan in bijlage II.

De data-acquisitiekaarten zijn beschikbaar gesteld door het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de faculteit der Civiele Techniek. Dit systeem kan door van buffers gebruik te maken alle kanalen op hetzelfde tijdstip samplen en herhalen dit na een tijdstap (dt). De kaarten zijn aangevuld met software, direct na een meting kunnen grafiekjes op het scherm geplot worden. De geschiktheid van de meetresultaten kan direct bekeken worden.



Figuur 1.1 De Trillo zoals die in het Zwin is gebruikt

3 Opzet en beschrijving van de testen

In deze paragraaf wordt de eerste opzet van de testen beschreven. De resultaten van de testen worden in bijlage II beschreven. Op welke wijze tot een betrouwbare keuze van de sampletijd kan worden gekomen wordt in paragraaf 3.2 beschreven.

3.1 Inleiding

In het Laboratorium voor Vloeistofmechanica is het gedrag van de trillingsmeter in stromend water getest. Hiertoe is de trillingsmeter, zoals reeds is beschreven, verbonden met een data-acquisitiesysteem. De lengte van de kabel die de verbinding vormt is 50 meter, analoog aan de kabellengte van de tweede Zwinproef.

De maximale stroomsnelheid die in de goot gecreëerd kan worden is 3.5 m/s, de waterdiepte is dan zeer gering en de afstroming is superkritisch. Tijdens de testen is de stroomsnelheid steeds stapsgewijs (stappen van 30 seconden) opgevoerd tot aan de maximale waarde en vervolgens weer stapsgewijs naar nul. Nadat het water een halve minuut had stilgestaan werd de snelheid zo snel mogelijk naar de maximale waarde gebracht en vervolgens weer zo snel mogelijk naar nul.

Bij verschillende snelheden is de respons van het instrument te volgen; ook de invloeden van snelle veranderingen bleek bij deze proeven waar te nemen.

Elke trillingsmeter is drie keer getest, een toevallig goede responsie wordt zo uitgesloten. In de grafieken in de bijlage 2 worden de resultaten weergegeven.

3.2 keuze van de sampletijd

Tijdens de proeven is bemonsterd met ongeveer 100 Hz (sampletijd 10.5 milliseconden). Voor betrouwbare meetresultaten is het gebruikelijk om de bemonsteringsfrequentie vier maal groter dan de eigenfrequentie van het meetsysteem te kiezen. (sampletijd vier maal zo klein) Op deze manier wordt voorkomen dat er toevallig alleen nulpunten of lage waarden worden doorgegeven en de hoge pieken uit het signaal gefilterd worden. De metingen van de eigenfrequenties tonen aan dat de bemonsteringsfrequentie voor het derde, vijfde en zesde metertje aan deze eis voldoet. De eigenfrequentie en de dempingstijd is bepaald met een oscilloscoop. Uit de grafieken van de metingen (bijlage II) blijkt dat ook de resultaten van de andere trillingsmetertjes goed zijn ondanks het feit dat de bemonsteringsfrequentie slechts 2.5 maal zo groot is in plaats van de vereiste vier maal.

De dempingstijd verschilt sterk per meetinstrument, een wat langere dempingstijd is gunstiger omdat een signaal daardoor langer aanwezig en dus beter waarneembaar is. Tijdens de bresgroeiproef zal geregistreerd worden met vier computers die elk veertig tot zestig minuten lang de signalen van 16 trillingsmeters vastleggen. De beperkende factor voor de keuze van de sample-tijd zou de beschikbare schijfruimte kunnen zijn.

De meetopstelling van de laboratoriumproeven

De definitieve tijd waarop het signaal tijdens het Zwin94experiment bemonsterd zal worden wordt in een later stadium door een reeks testen bepaald als de inhoud en het uiterlijk van de trillingsmeter definitief bekend is.

trillingsmeter nummer	eigenfrequentie [Hz]	dempingstijd [s]
1	40	1
2	33	0.6
3	21	5
4	30	2.3
5	14	3
6	21	8

Tabel 3.1 Weergave van de eigenfrequentie en de dempingstijd van elke trillingsmeter.

Een meting van zeven minuten (met twee kanalen), met een sampletijd van 10.5×10^{-3} seconden heeft een bestand van 250 Kb als resultaat. De resultaten van een meting van 40 minuten zijn dus weggeschreven in een bestand van 1.4 MB. Voor 16 kanalen is alleen voor het opslaan van de bestanden ongeveer 11.5 Mb vrije schijfruimte nodig. In extra ruimte voor software is dan nog niet voorzien. Aangezien de beschikbare computers (waarin de data-kaarten zijn ingebouwd, gebruik van andere computers is niet gewenst omdat de data-kaarten dan overgezet moeten worden) totaal 20 tot 40 MB vrije schijfruimte hebben is samplen met een bemonsteringsfrequentie van 100 Hz dus mogelijk. Een uitbreiding van de metingen tot 60 minuten of langer zal met de beschikbare schijfruimte geen problemen opleveren

Hoewel de grootte van de bestanden waarin de meetwaarden opgeslagen worden enorm is, worden er geen grote problemen verwacht met de dataverwerking. In het volgend hoofdstuk wordt beschreven op welke wijze een grote hoeveelheid data met behulp van een dataverwerkingsprogramma eenvoudig kan worden verkleind.

4 Verwerking van de databestanden

In dit hoofdstuk wordt beschreven op welke wijze de door het data-acquisitiesysteem opgeslagen data grafisch weergegeven (QPRPO) kan worden. Deze omzetting gebeurt in drie stappen, deze stappen worden achtereenvolgens beschreven.

4.1 Omzetten van de data naar een leesbaar bestand

De data wordt door het data-acquisitiesysteem binair opgeslagen, niet zomaar oproepbaar als een ASCII bestand. Deze niet direct leesbare file moet eerst worden omgezet. De dataverwerking verloopt globaal gezien volgens drie stappen:

- Inlezen en laten converteren door programmapakket B2A. Dit is een pakket dat door medewerkers van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica speciaal is ontwikkeld voor het omzetten (converteren) van data. De uitvoer bestaat nu uit drie kolommen waarin achtereenvolgens de tijd ($t=0$ is de start van de proef), de uitvoer van het eerste kanaal (In dit geval het voltage van de trillingsmeter) en de uitvoer van het tweede kanaal (de snelheid, gemeten door de EMS) staan.
- De uitvoerfile van het B2A programma wordt ingelezen in een pascalprogramma, de hoeveelheid data wordt hierdoor sterk verminderd, zie paragraaf 4.2
- De uitvoerfile van het in de volgende paragraaf beschreven programma kan nu met behulp van een spreadsheet op eenvoudige wijze grafisch weergegeven worden.

4.2 Beschrijving van het dataverwerkingsprogramma

Zoals in paragraaf 4.1 is vermeld wordt in deze paragraaf het vervaardigde Pascal-programma ten behoeve van de datareductie besproken. Dit programma bewerkt een invoerfile die bestaat uit drie kolommen, respectievelijk de tijd, de uitvoer van de trillingsmeter en de snelheid.

Van elke 200 meetwaarden wordt van de eerste (de tijd) en de derde (de snelheid) kolom de gemiddelde waarde bepaald. Van de snelheid (en de tijd) valt met redelijke zekerheid aan te nemen dat de fluctuaties dusdanig klein zijn dat alleen bepalen van de gemiddelde waarde voldoende is.

Van de tweede kolom wordt binnen de 200 waarden gezocht naar de maximale waarde en de minimale waarde, ook het gemiddelde (van de absolute waarden) en de standaardafwijking wordt berekend. Deze informatie bleek in dat verband voldoende om een beschrijving van het gedrag in water mogelijk te maken.

In het programma worden achtereenvolgens, in groepen van 200 waarden, alle meetwaarden ingelezen. Het gemiddelde hiervan wordt bepaald door optellen van alle meetwaarden (absolute waarde) en vervolgens te delen door 200. Maximale en minimale waarden worden gevonden door elke nieuw in te lezen waarde te vergelijken met de tot dan toe hoogste gevonden waarde en de hoogste (voor de minimale waarde de laagste) waarde wordt onthouden. De standaarddeviatie wordt bepaald nadat het gemiddelde bekend is, hiertoe worden alle 200 waarden, die daartoe in een array zijn opgeslagen, weer teruggehaald.

Uiteindelijk worden de berekende waarden opgeslagen in een uitvoerfile. Achtereenvolgens wordt in die file de tijd, de maximale waarde van de trillingsmeter, de minimale waarde van de trillingsmeter, de gemiddelde trillospanning, de afwijking van de gemiddelde trillospanning en de gemiddelde snelheid in kolommen neergezet. De bereikte compressie is 100:1.

Deze procedure wordt herhaald tot aan het eind van de invoerfile.

Grafische weergave volgt door de uit PASCAL weggeschreven uitvoerfile te importeren in een spreadsheet programma, voor deze grafische afwerking is gebruik gemaakt van Quattro Professional 4.0 (QPRO).

Het programma kan dus ook voor de dataverwerking van de meetwaarden van de Zwinproef gebruikt worden.

5 Resultaten

De keuze van de definitieve vorm van de trillingsmeter wordt enerzijds bepaald door de resultaten van de testen. Bij vrijwel gelijke geschiktheid is de praktische uitvoerbaarheid de doorslaggevende factor. Onderstaande tabel is een samenvatting van de resultaten die in de bijlagen volledig (grafisch) weergegeven zijn.

	Nummer van de trillingsmeter								
	1			2			3		
	spanningswaarde binnen onderstaand (water)snelheidsbereik								
V	0-1	1-2	2-4	0-1	1-2	2-4	0-1	1-2	2-3
gem	0.1	0.3	0.6	0.1	0.4	0.7	0.1	0.3	0.6
max	0.2	1.0	2.1	0.3	1.0	2.2	0.2	0.7	2.0
min	0.2	1.1	2.0	0.3	0.9	2.2	0.2	0.6	2.2

Tabel 5.1 Samenvatting van de resultaten van de testen met de trillingsmeter (nr. 1, 2 en 3)

	Nummer van de trillingsmeter								
	4			5			6		
	spanningswaarde binnen onderstaand (water)snelheidsbereik								
V	0-1	1-2	2-4	0-1	1-2	2-4	0-1	1-2	2-3
gem	0	0.1	0.3	0.1	0.3	0.7	0	0.1	0.5
max	0	0.2	1.2	0.2	0.5	2.3	0	0.3	1.1
min	0	0.2	1.5	0.2	0.5	2.4	0	0.3	0.9

Tabel 5.2 Samenvatting van de resultaten van de testen met de trillingsmeter (nr. 4, 5 en 6)

De trillingsmeters zijn getoetst volgens de eisen met betrekking tot de meetresultaten (zie paragraaf 1.2). Het instrument moet het verschil tussen beweging en rust duidelijk aangeven. Een duidelijke weergave van de spanningen is een subjectief criterium. Een onderlinge vergelijking van de resultaten van de metingen geeft een objectiever beeld. De trillingsmeter is getest bij zo hoog mogelijke stroomsnelheid. Tijdens het Zwin94 experiment wordt een stroomsnelheid van 4 m/s verwacht [3], [6]. Deze extreme

snelheid kon nauwelijks in het laboratorium gerealiseerd worden, maximaal mogelijk was 3.5 m/s, dit kon alleen met een geringe waterdiepte. Het meetinstrument kon hierdoor niet altijd vrij in de stroming bewegen. Het gebeurde regelmatig dat het meetinstrument veelvuldig tegen de wand klapperde. De werkelijke response van de trillingsmeter leek daarom in eerste instantie moeilijk te voorspellen.

In de grafieken waarin de resultaten van de is weergegeven (bijlage II) is dit klapperen echter goed te onderscheiden van het werkelijke signaal. In de grafieken zijn sterke uitschieters van het signaal waarneembaar. Deze extreem hoge waarden zijn vaak meer dan twee maal zo groot als het overige signaal. Waargenomen is dat deze uitschieters door het klapperen tegen de gootwand veroorzaakt worden. Bij de beschrijving van de resultaten zijn deze extreme waarden buiten beschouwing gelaten

Uit de grafieken kan wordt geconcludeerd dat elke configuratie voldoet aan de gestelde eisen. In elke grafiek is het onderscheid tussen rust en beweging goed waarneembaar, dit betekent dat elk meetinstrument voldoet. Er is verschil in de maximale uitwijking en in de gemiddelde waarde, dit wordt kort beschreven:

- trillo 1: variatie tussen de +/- 2.0 volt, tevens een hoge gemiddelde waarde: deze geeft goede resultaten.
- trillo 2: variatie tussen de +/- 2.2 volt, tevens een hoge gemiddelde waarde: deze geeft goede resultaten.
- trillo 3: variatie tussen de +/- 2.1 volt, tevens een hoge gemiddelde waarde: deze geeft goede resultaten.
- trillo 4: variatie tussen de +/- 1.3 volt, dit is laag ten opzichte van trillo 1, 2, 3 en 5. Tevens een lager gemiddelde. De meter voldoet maar de trillingen zijn klein ten opzichte van de genoemde meters.
- trillo 5: variatie tussen de +/- 2.1 volt, tevens een hoge gemiddelde waarde: deze geeft goede resultaten.
- trillo 6: variatie tussen de +/- 1.0 volt, dit is laag ten opzichte van trillo 1, 2, 3 en 5. Tevens een lager gemiddelde. De meter voldoet maar de trillingen zijn klein ten opzichte van de genoemde meters.

Elke meter voldoet aan de gestelde eisen. De werking van de meter is kennelijk niet sterk afhankelijk van kleine variaties in de uitvoering. Dit is een zeer gunstig resultaat aangezien in zeer kort tijdsbestek 64 trillingsmeters moeten worden gerealiseerd.

Er is geen duidelijke relatie tussen eigenfrequentie, dempingstijd en de resultaten waarneembaar. Er is ook geen (betrouwbare) relatie tussen de configuratie (wel of geen veertje, lengte van het boutje) en de resultaten gevonden.

Tijdens het solderen bleek dat trillo 3 het beste is wanneer getoetst wordt naar praktische uitvoerbaarheid. Deze configuratie van de trillingsmeter is voor de test met een dijk op schaal (op het strand) gebruikt. (zie hoofdstuk 6)

Een kwalitatieve test in een goot heeft aangetoond dat een cilindervormige doosje vanwege zogvorming heftiger trilt dan het vierkante doosje bij dezelfde stroomsnelheid), deze vorm is gekozen. Dit blijkt ook uit de literatuur [1].

De grafieken in de bijlagen zijn als volgt genummerd: het nummer achter tri is het nummer van het meetinstrument, het nummer achter EMS geeft het nummer van de proef aan.

6 Simulatie dijkdoorbraak in 't Zwin op kleine schaal

De trillingsmeter die uit bovenstaande experimenten als beste naar voren kwam is verder getest tijdens een doorbraakproefje in de monding van het Zwin. Voor deze proef is tijdens eb een dijkje aangelegd van ongeveer 0.75 meter hoog met een kruinbreedte van ongeveer 20 cm. De trillingsmeter, die verbonden was met een voltmeter om het uitgangssignaal te kunnen bekijken, werd, op een vooraf bekende plaats, in de dijk ingegraven.

Gebleken is dat door het zandpakket (zo'n 40 cm dik) slechts in beperkte mate trillingen werden doorgegeven. Dit is getest door de invloeden van langs de dijk stromend water en de invloed van een aantal stevige klappen met een schop op het zandpakket op het uitgangssignaal (zichtbaar gemaakt door een voltmeter) te bestuderen. Het uitgangssignaal dat tijdens het losspoelen van het instrument afgegeven werd, was duidelijk te onderscheiden van de trillingen in het zandpakket. Dit gold ook voor de trillingen die door de turbulente stroming achter de (doorbrekende) dijk ontstonden. In tabel 6.1 zijn de resultaten weergegeven.

	maximale waarde multimeter *10 ⁻³ Volt
stand van multimeter bij stilhouden van het instrument	0.3
uitslag door waterstroming langs het dijklichaam	0.3 à 10
uitslag door een klap met een schep	10 à 50
uitslag tijdens loskomen instrument	150 à 200++
uitslag in turbulente neerstroming	150 à 200++
uitslag in stromend water (ca 1.2 m/s)	100 à 150

Tabel 6.1 Uitslag van de voltmeter tijdens de testen met de trillingsmeter (op het strand).

Deze simulatie op schaal toont aan dat het onderscheidend vermogen tussen vastzitten in een trillend zandpakket en de stroming van water goed genoeg is. Het loskomen van het meetinstrumentje was duidelijk waarneembaar: het maximale voltage tijdens loskomen was meer dan 200 millivolt, het maximale bereik van deze stand waarop de multimeter was ingesteld.

7 Conclusie

De trillingsmeter geschikt is om de overgang tussen zand en water te detecteren. Dit volgt zowel uit de laboratoriumproeven als uit de simulatie van de dijkdoorbraak. De trillingsmeter zal daarom tijdens het Zwin94 experiment gebruikt kunnen worden als dieptemeter. Elke getoetste configuratie van het meetinstrument voldoet aan de in paragraaf 1.2 gestelde eisen.

Met deze proeven serie is tevens aangetoond dat de dataverwerking geen noemenswaardige problemen op zal leveren. De grote bestanden die ontstaan, zijn met behulp van een eenvoudig programma om te zetten naar een (ASCII) document van geringe grootte waarmee in elk spreadsheet-programma eenvoudig gewerkt kan worden.

De trillingsmeter is als meetinstrument alleen kwalitatief te gebruiken, een kwantitatief gebruik, als snelheidsmeter is niet mogelijk. De verschillen tussen de verschillende configuraties van de trillingsmeter zijn daarvoor te groot. De instrumenten variëren onder andere in kristalstructuur, afmeting van de diverse elementen, afmeting van de boutjes (dikte en lengte) en in de afmeting en stijfheid van de veertjes. Deze variatie had deels voorkomen kunnen worden door materiaal van een betere kwaliteit te gebruiken.

- *Aanbevelingen:*

Voor een toekomstig gebruik van de trillingsmeter als (kwalitatief) meetinstrument is meer onderzoek gewenst, dit zal zich onder andere moeten richten op:

- Onderzoek naar: de relatie tussen de vorm van de omhulling en de respons; wervelingen achter het instrument zijn van grote invloed op de sterkte van de trillingen. Wat is de invloed van de eigenfrequentie en de dempingstijd.
- De grootte en het gewicht van het boutje (en eventueel veertje) dat aan het piëzo-elektrische elementje gesoldeerd is.
- Voor de kabeldoorvoering is een betere (waterdichte) configuratie gewenst.
- Er moet een goede trekontlasting tussen de trillingsmeter en de opslaglokatie (daar waar de data-acquisitie systemen staan) komen. Een geringe spanning op de coaxkabel kan de meting verstoren.
- Een tweede toetsing met betrekking op het gedrag in zand is aan te bevelen.

De trillingsmeter lijkt goed geschikt voor het doel waarvoor hij is ontworpen, een toepassing buiten de oorspronkelijke doelstelling (bijvoorbeeld als snelheidsmeter) wordt met de huidige configuratie afgeraden.

Literatuurlijst

- [1] Battjes, J.A., 1990. Vloeistofmechanica. Collegedictaat. Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Waterbouwkunde, 213 pp.
- [2] Dieteren, J.M.L. en Pottinga, P.H., 1988. Stroomgatontwikkeling tijdens dijkdoorbraak. Afst.rapport, Vakgroep Waterbouwkunde, Fac. der Civiele Techniek, T.U. Delft, 217 pp.
- [3] Loeff, A.P. de, 1990. Bresgroei in een zanddijk, feitenverslag van een proef. Rapport: WBA-R-90.041, Afd. Advisering Waterbouw, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Rijkswaterstaat, Delft, 31 pp.
- [4] Smit, M.J. en Snip, D.W., 1995. Voorbereiding voor een bresgroeiexperiment in het Zwin, deel II Praktisch vooronderzoek. Afst.rapport, Vakgroep Waterbouwkunde, Fac. der Civiele Techniek, T.U. Delft.
- [5] Smit, M.J. en Snip, D.W., 1995. Voorbereiding voor een bresgroeiexperiment in het Zwin, deel I Theoretisch vooronderzoek. Afst.rapport, Vakgroep Waterbouwkunde, Fac. der Civiele Techniek, T.U. Delft.
- [6] Visser, P.J, Ribberink, J.S. en Katwijk, J.P.Th., 1986. Ontwikkeling stroomgat en debiet bij dijkdoorbraak; deelstudie van een pompaccumulatiecentrale. Rapp. no. 8-86, Vakgroep Waterbouwkunde, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft.

Bijlagen

Bijlage I: Listing van het dataverwerkingsprogramma

{Dit programma bewerkt een invoerfile geproduceerd door een data-}
{acquisitiesysteem. Van elke 200 meetwaarden wordt de maximale waarde}
{de minimale waarde, het gemiddelde, en de standaarddeviatie berekend}

```
PROGRAM databewerking (output);
uses crt;
CONST Ctril = 0.261;
      Cems  = 0.498;
VAR  tijd,tijdtot,tijdgem:real;           {seconde waarin de waarde
                                          gemeten} {is}
      trill,trilltot,trillogem,trillosd,trillomax,trillomin:real;
                                          {uitvoerwaarde van de trillo}
      ems,emstot,emsgem:real;           {uitvoerwaarde van de ems}
      temp,temp1,verschil,sqrverschil,somverschil,wortelsomverschil:real;
      teller:integer;
      trillo: array [1..200] of real;
      output,invoer:text;

BEGIN
assign(invoer,'C:\marion\pascal\trilems1.txt');
reset(invoer);
assign (output,'c:\marion\pascal\trilems1.pas');
rewrite (output);

tijd:=0;
tijdtot:=0;
tijdgem:=0;
trilltot:=0;
trillogem:=0;
trillomax:=0;
trillomin:=0;
trill:=0;
ems:=0;
emstot:=0;
emsgem:=0;
verschil:=0;
sqrverschil:=0;
somverschil:=0;
wortelsomverschil:=0;
temp:=0;
temp1:=0;

REPEAT
  teller:=1;
  FOR teller:=1 TO 200 DO
  BEGIN
    read(invoer,tijd);
```


Bijlagen

```
read(invoer,trillo[teller]);      readln(invoer,ems);
trill:=ctril*trillo[teller];      {vermenigvuldigen met
                                   constanten om} {juiste}

if ems>temp1 then                  {voltage en snelheid te
temp1:=ems;                        krijgen}
tijdtot:=tijdtot+tijd;            {optellen alle waarden binnen
trilltot:=trilltot+abs(trill);     de} {200}
                                   {stappen delen door 200
                                   geeft}
                                   {gemiddelde}

emstot:=emstot+ems;
IF trill>0 THEN                    {bepaal maximale waarde
                                   binnen de}
                                   {200 stappen}

IF trill>trillomax THEN
trillomax:=trill;
IF trill<0 THEN                    {bepaal minimale waarde
                                   binnen de}
                                   {200 stappen}

IF trill<trillomin THEN
trillomin:=trill;
END;
tijdgem:=tijdtot/200;
trillogem:=trilltot/200;
emsgem:=cems*(emstot/200);
if emsgem>temp then
temp:=emsgem;
FOR teller:=1 TO 200 DO
BEGIN
verschil:=abs(abs(trillo[teller])-trillogem);
sqrverschil:=verschil*verschil;
somverschil:=somverschil+sqrverschil;
END;
wortelsomverschil:=sqrt(somverschil);
trillosd:=wortelsomverschil/199;
writeln(output,tijdgem:4,' ',trillomax:2:4,' ',trillomin:2:4,'
',trillogem:2:4,' ',trillosd:2:4,' ',emsgem:2:4);
trillomax:=0;
trillomin:=0;
tijdtot:=0;
trillosd:=0;
trilltot:=0;
emstot:=0;
somverschil:=0;
write('. ');
until eof(invoer);
close (output);
writeln;
write(temp1,temp);
readln;
end.
```

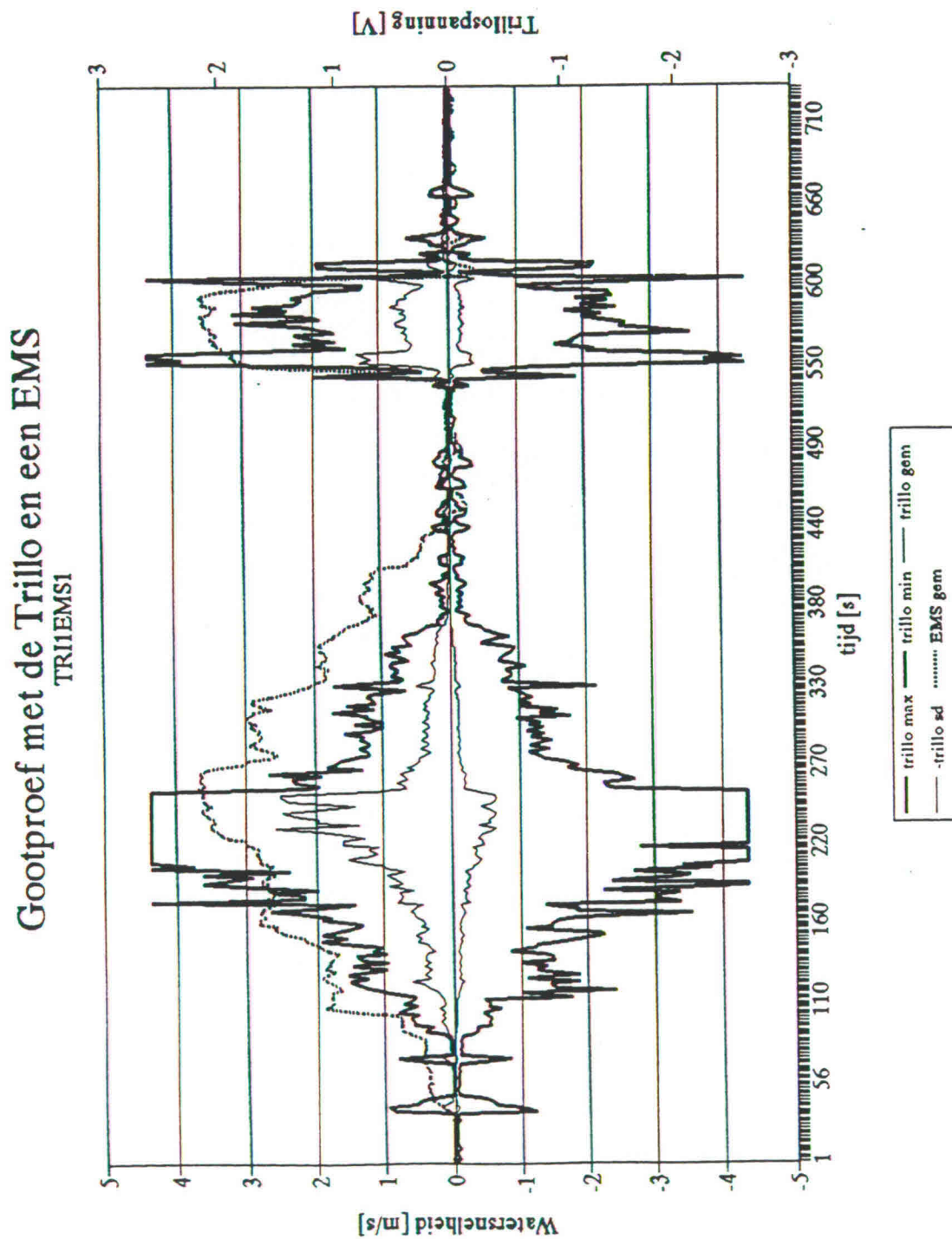

Bijlage II: resultaten van de experimenten met de trillingsmeters

In deze bijlage worden de grafieken van de resultaten van de testen met de trillingsmeter weergegeven. Er worden totaal 18 grafieken getoond, 6 trillingsmeter configuraties met 3 testen per configuratie. Elk figuur is genummerd volgens: TRIaEMSb, dit betekent dat dit de b-de test met configuratie a is.

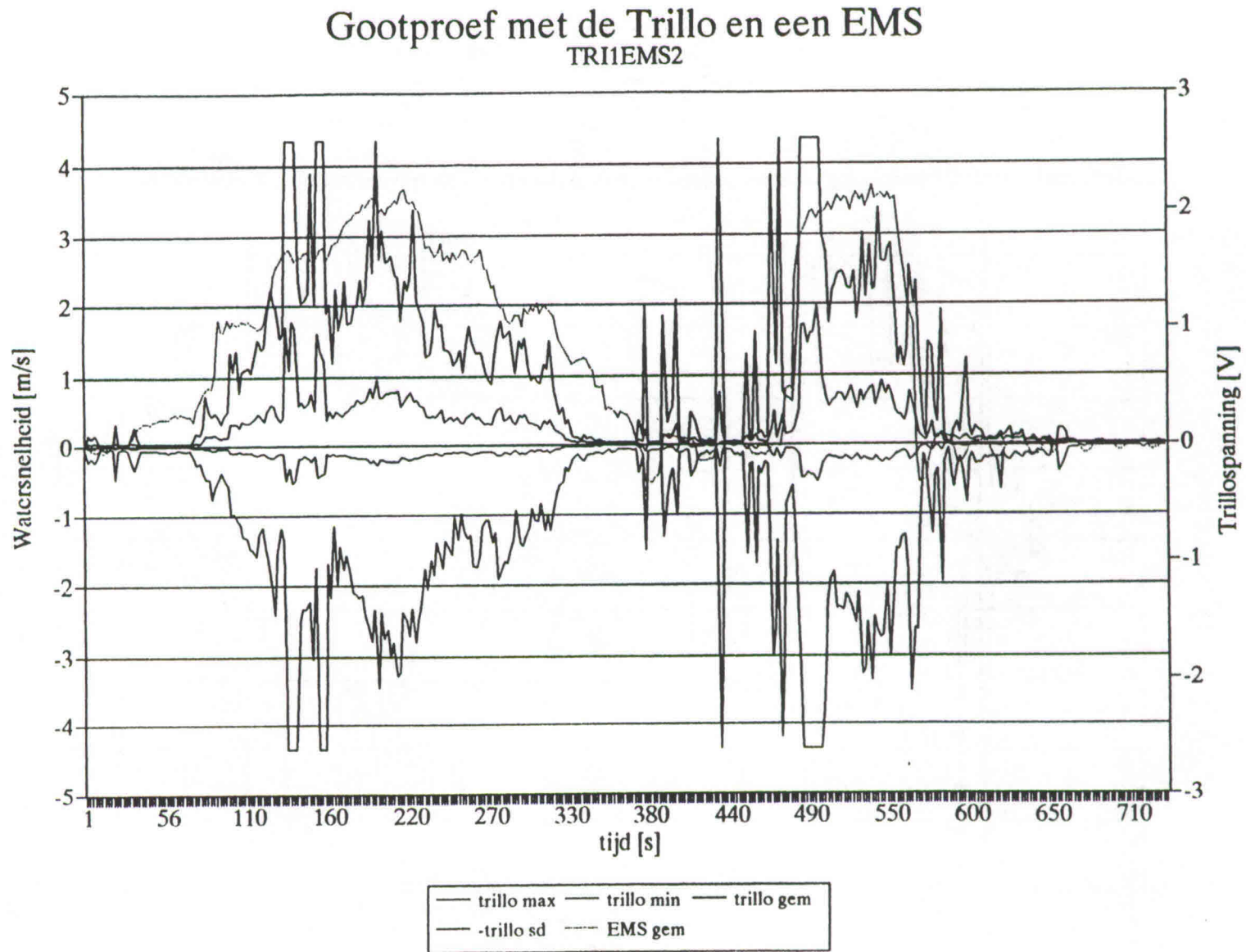
In elke grafiek worden over 200 waarden de maximale waarde, de minimale waarde, de standaard-deviatie en de gemiddelde waarde gegeven. De pieken worden getoond om de maximale uitwijking te laten zien. Het gemiddelde en de standaard-deviatie geven aan of dit een structurele of een toevallige uitwijking was. Op de linker y-as is de watersnelheid behorende bij het signaal weergegeven.

Uit de grafieken blijkt duidelijk dat de uitwijking toeneemt met toenemende snelheid.

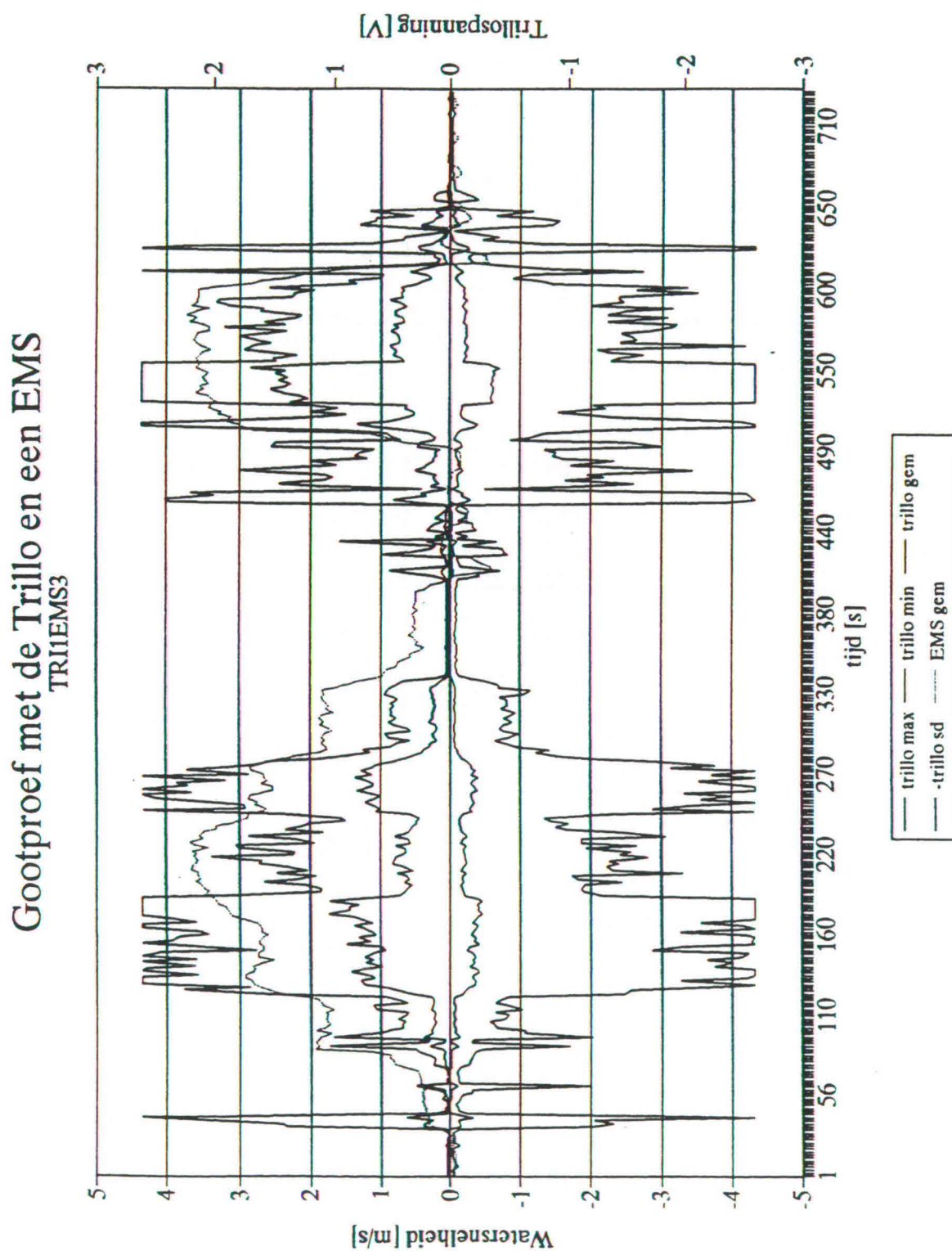
Figuur BII:1.1: Test 1 met configuratie 1



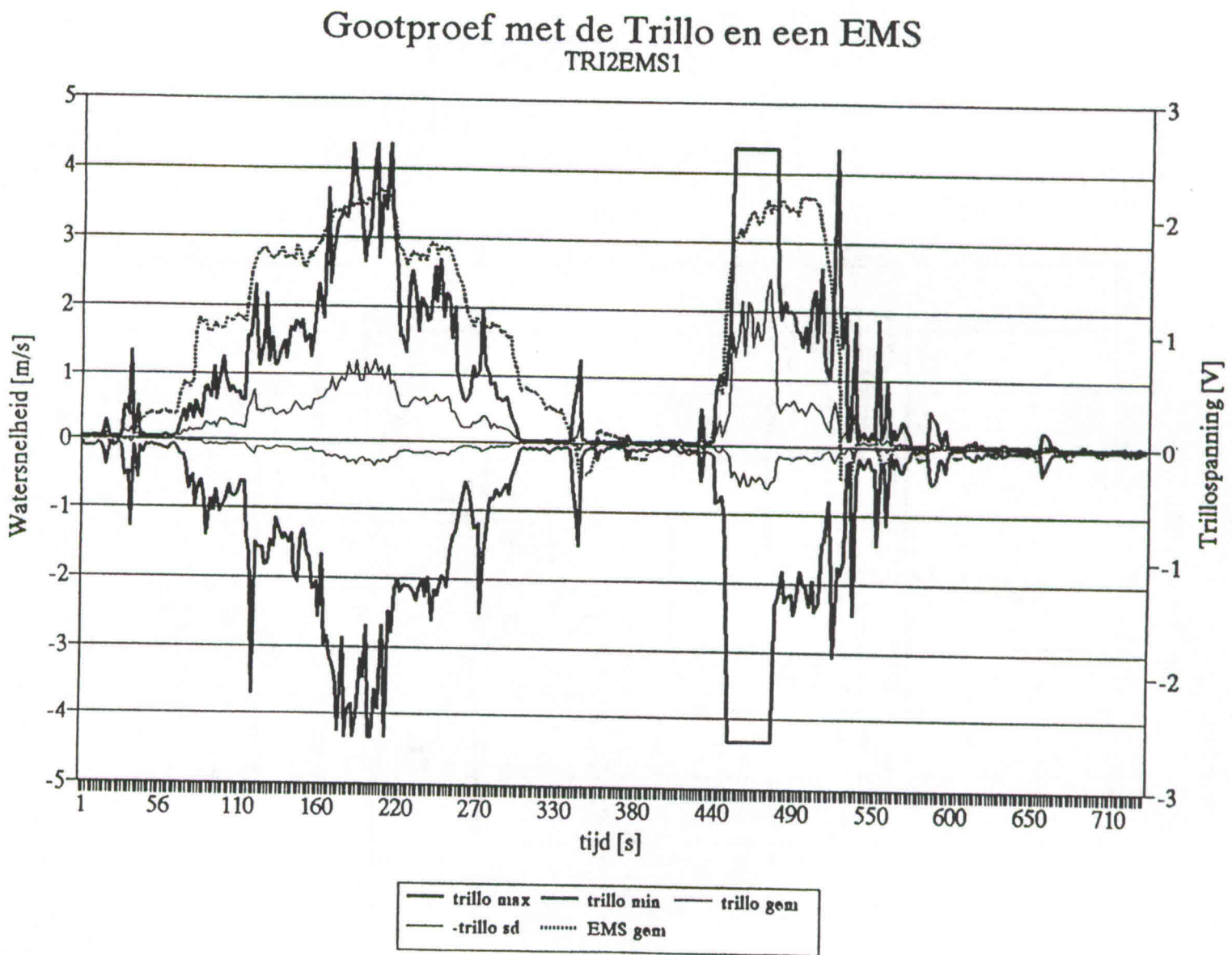
Figuur BII:1.2: Test 2 met configuratie 1



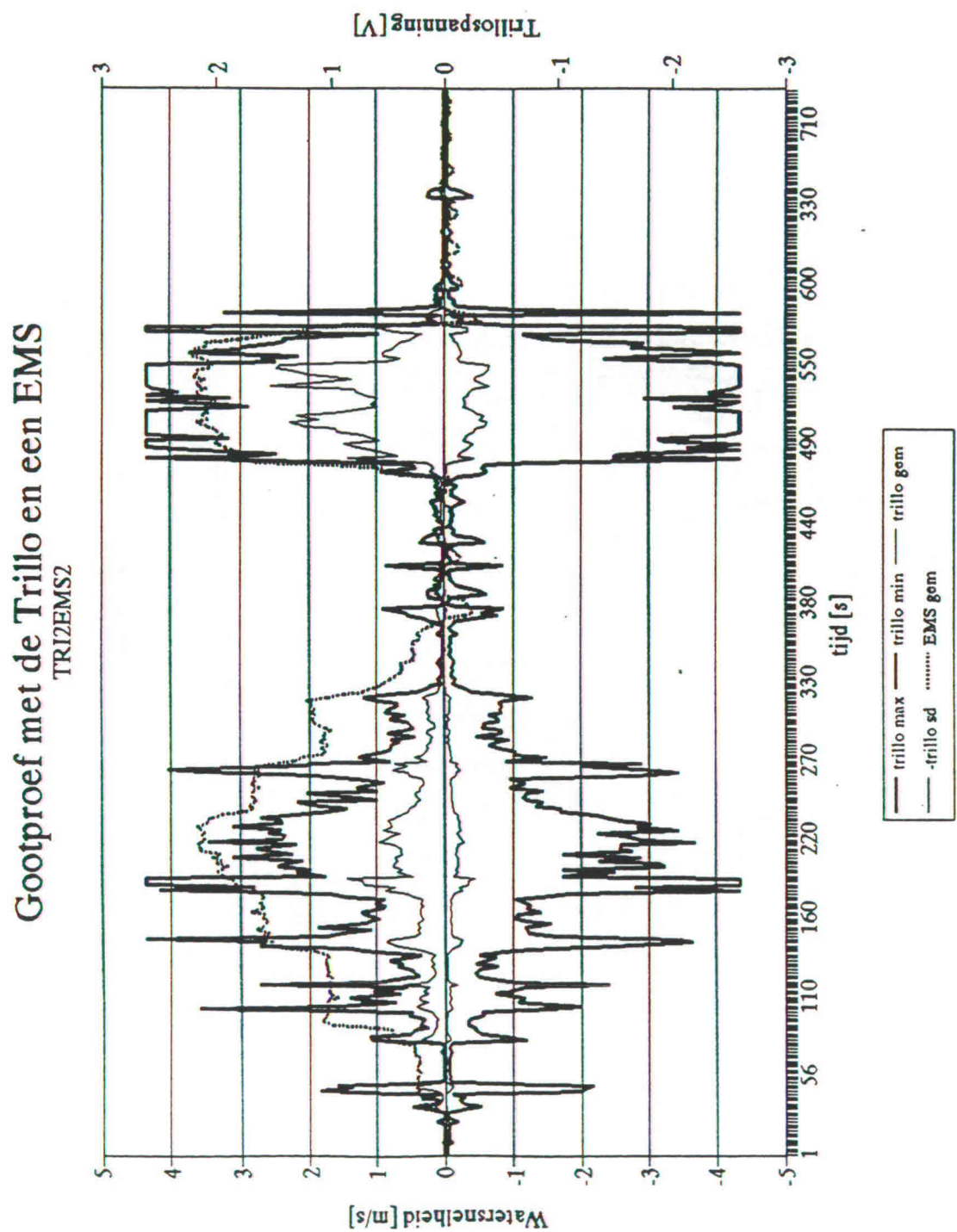
Figuur BII:1.3: Test 3 met configuratie 1



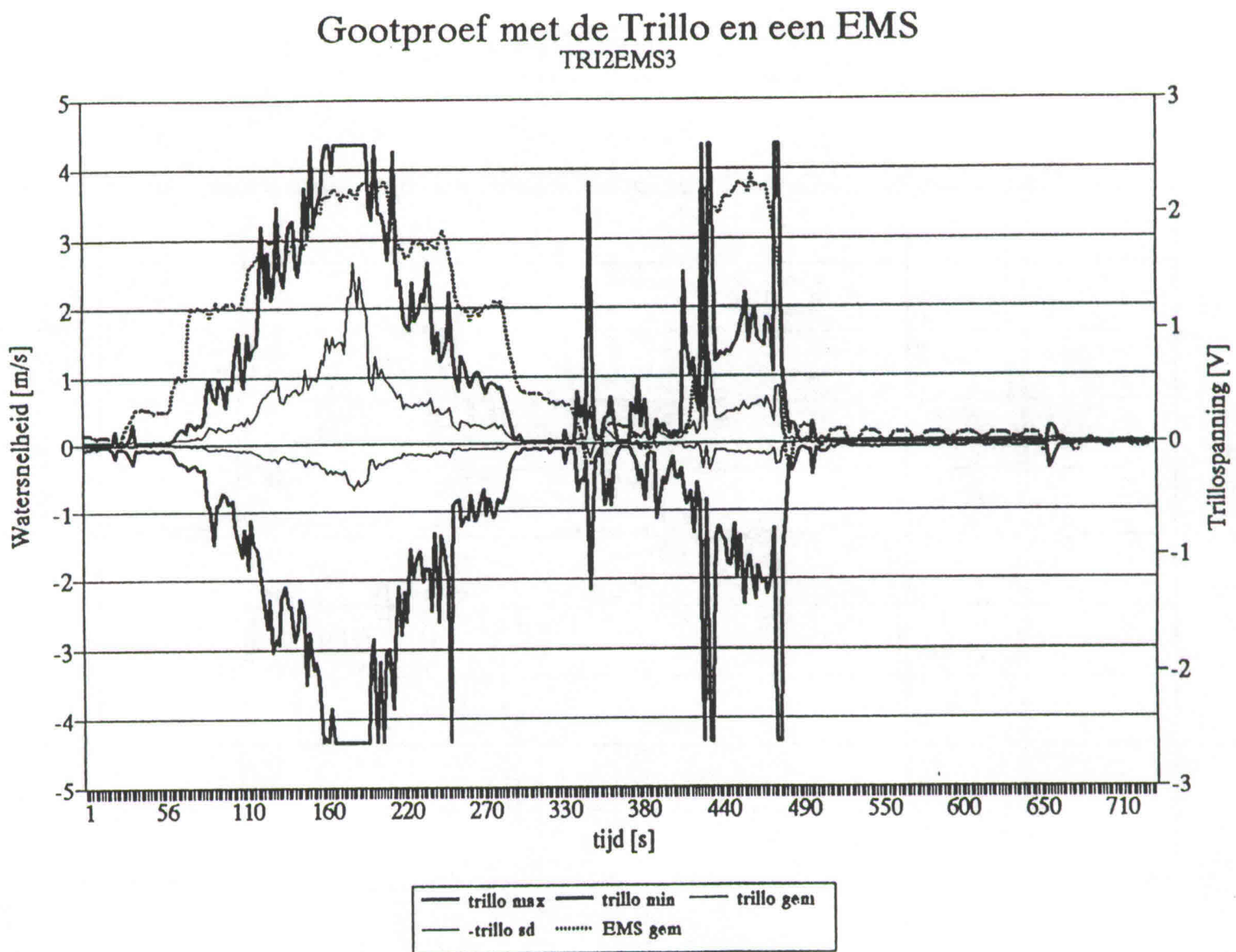
Figuur BII.2.1: Test 1 met configuratie 2



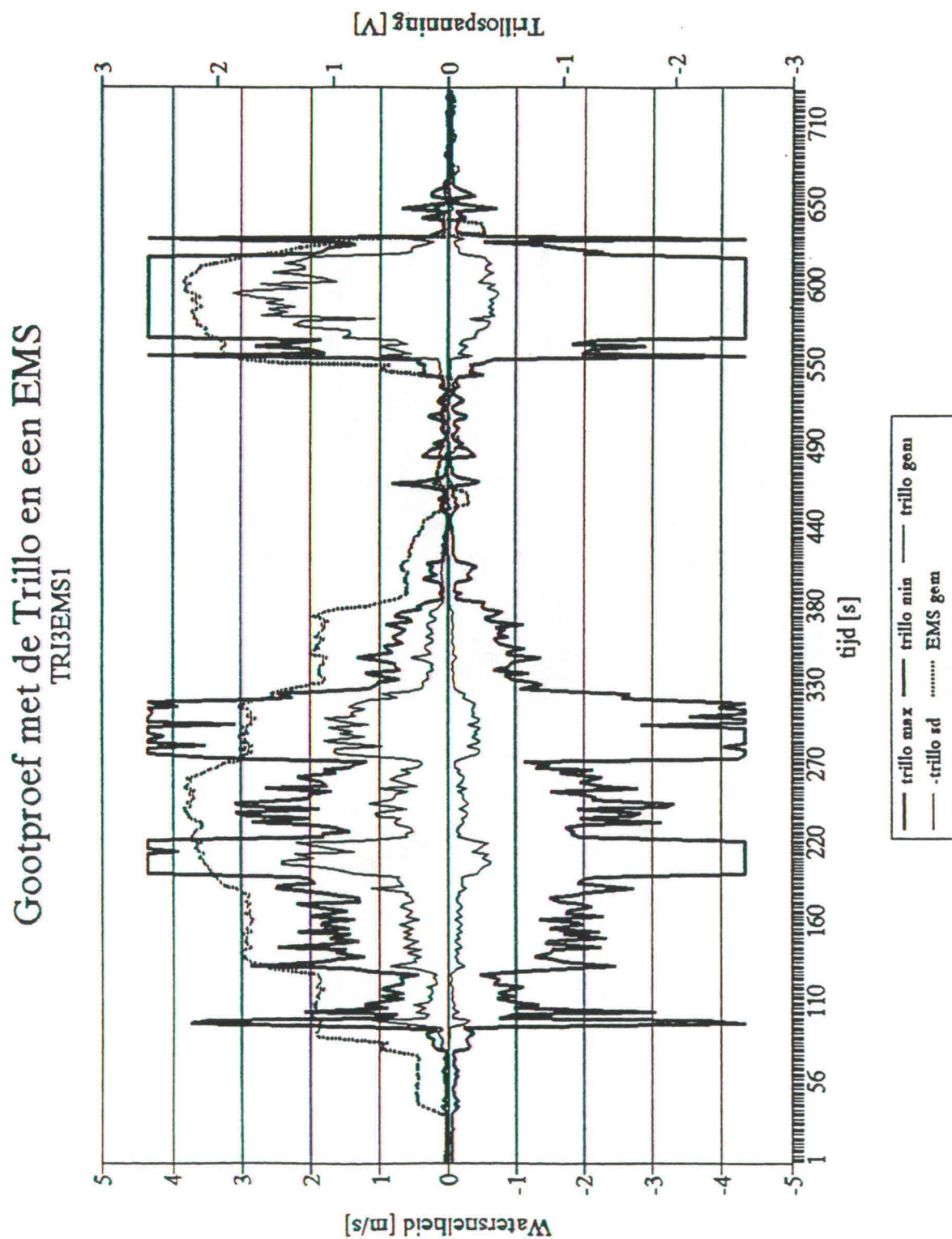
Figuur BII:2.2: Test 2 met configuratie 2



Figuur BII:2.3: Test 3 met configuratie 2



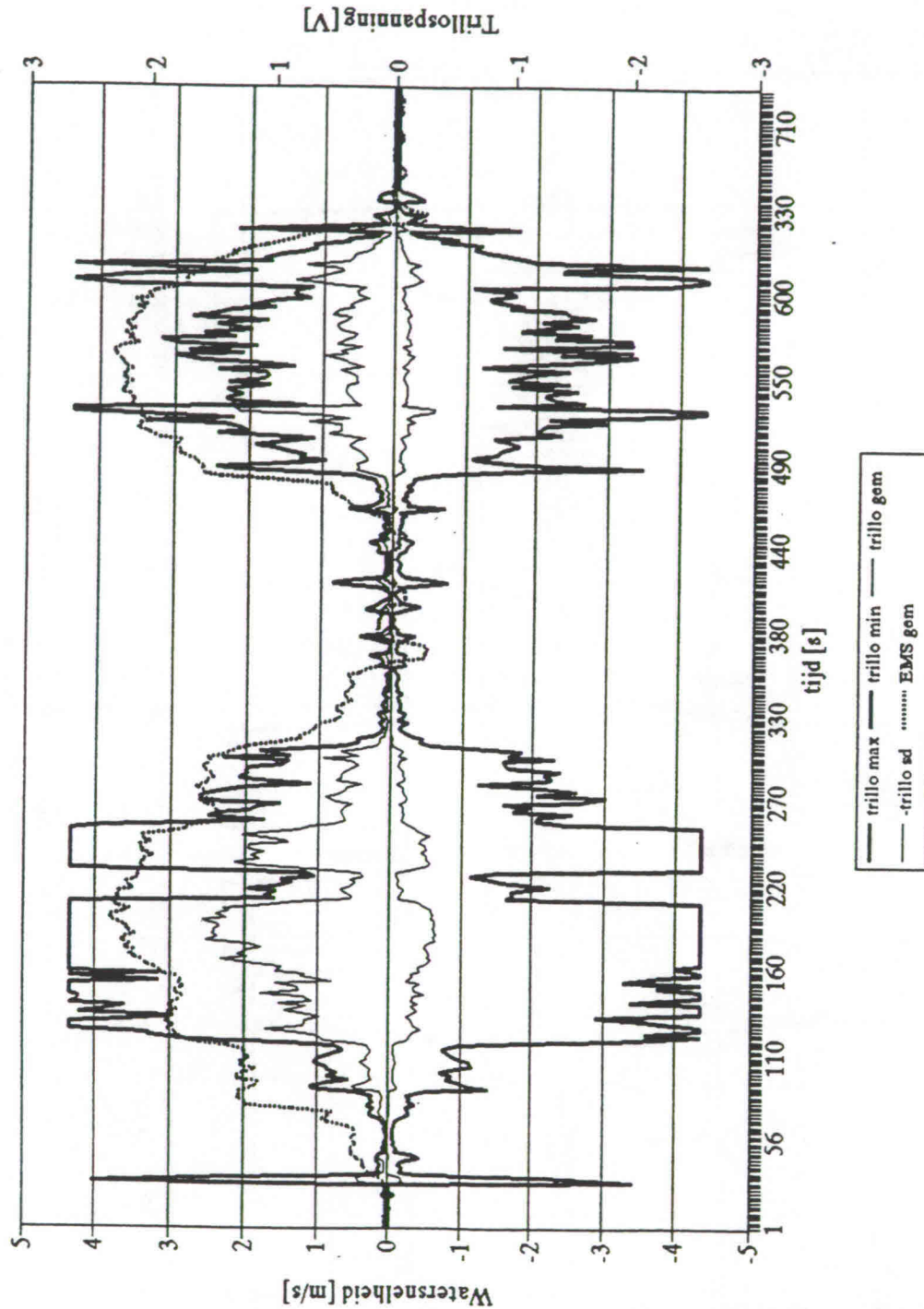
Figuur BII:3.1: Test 1 met configuratie 3



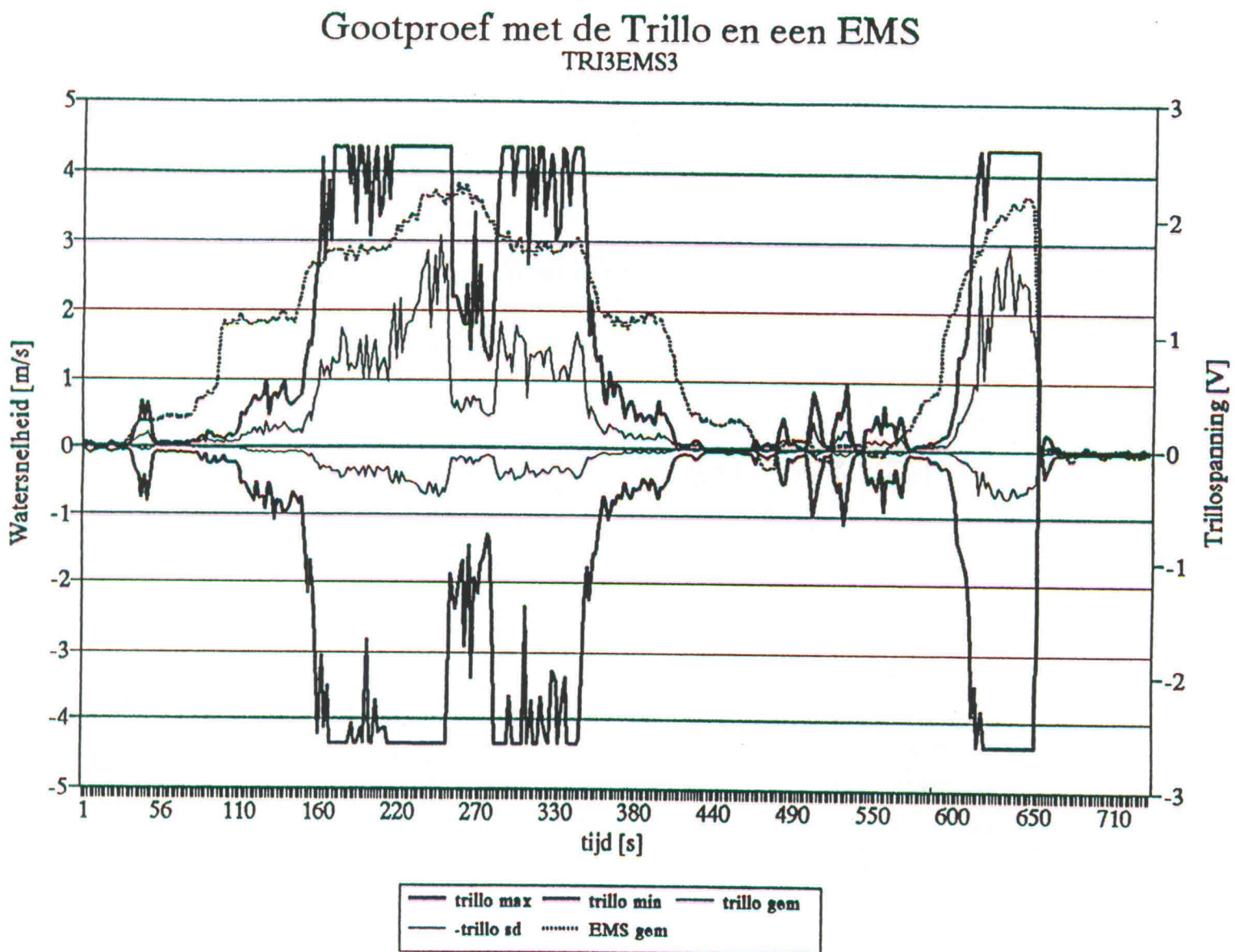
Figuur BII:3.2: Test 2 met configuratie 3

Gootproef met de Trillo en een EMS

TRI3EMS2

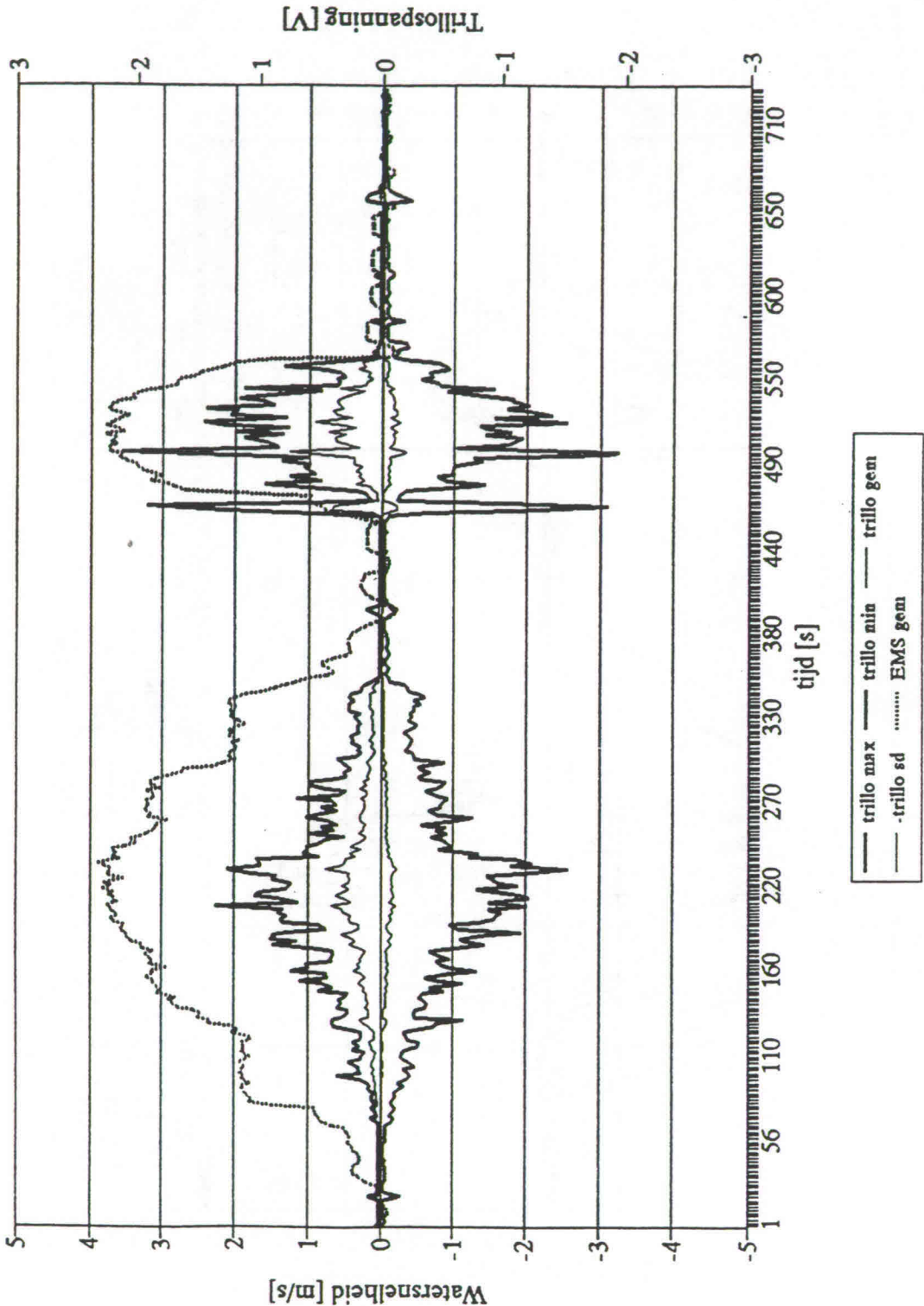


Figuur BII:3.3: Test 3 met configuratie 3

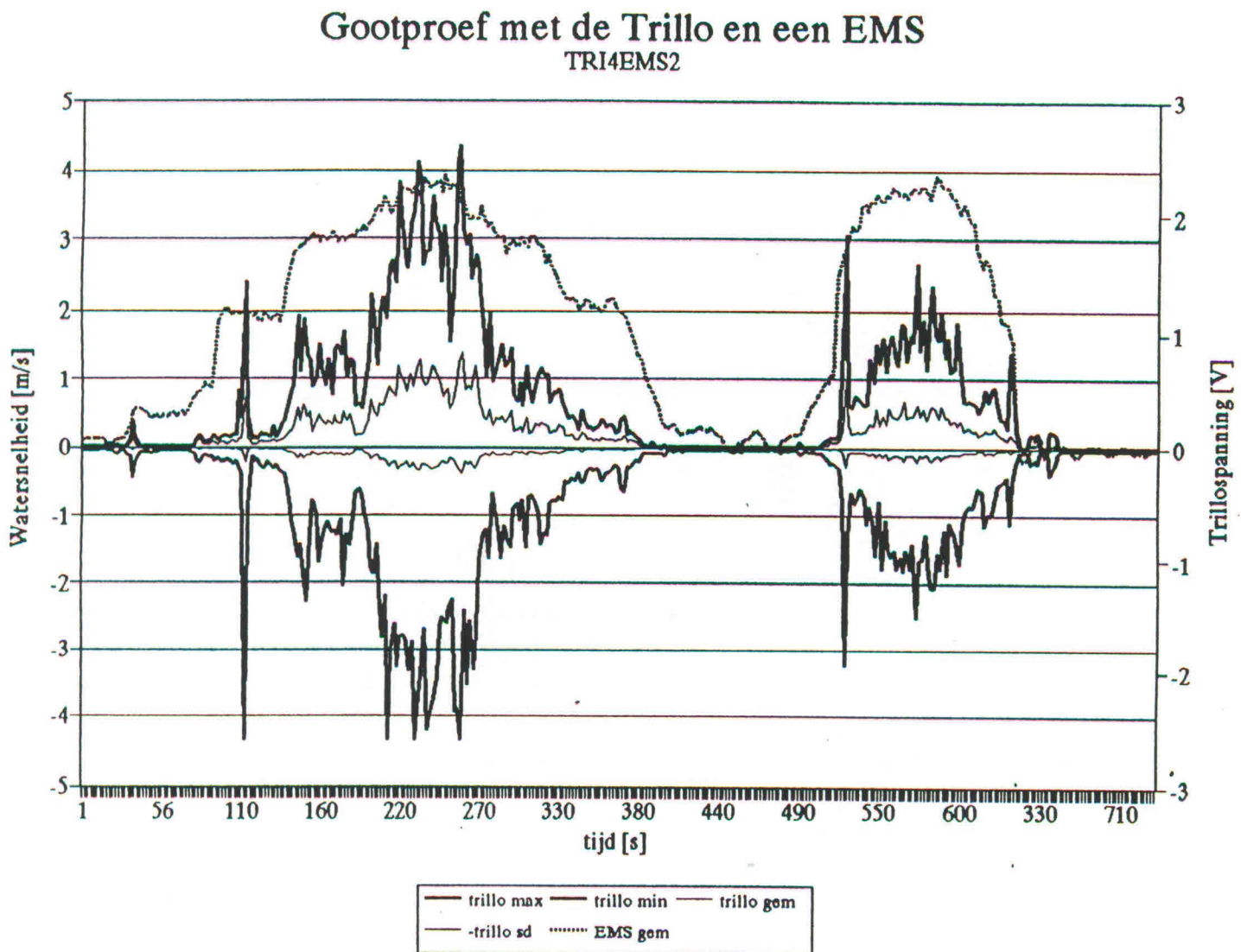


Figuur BII:4.1: Test 1 met configuratie 4

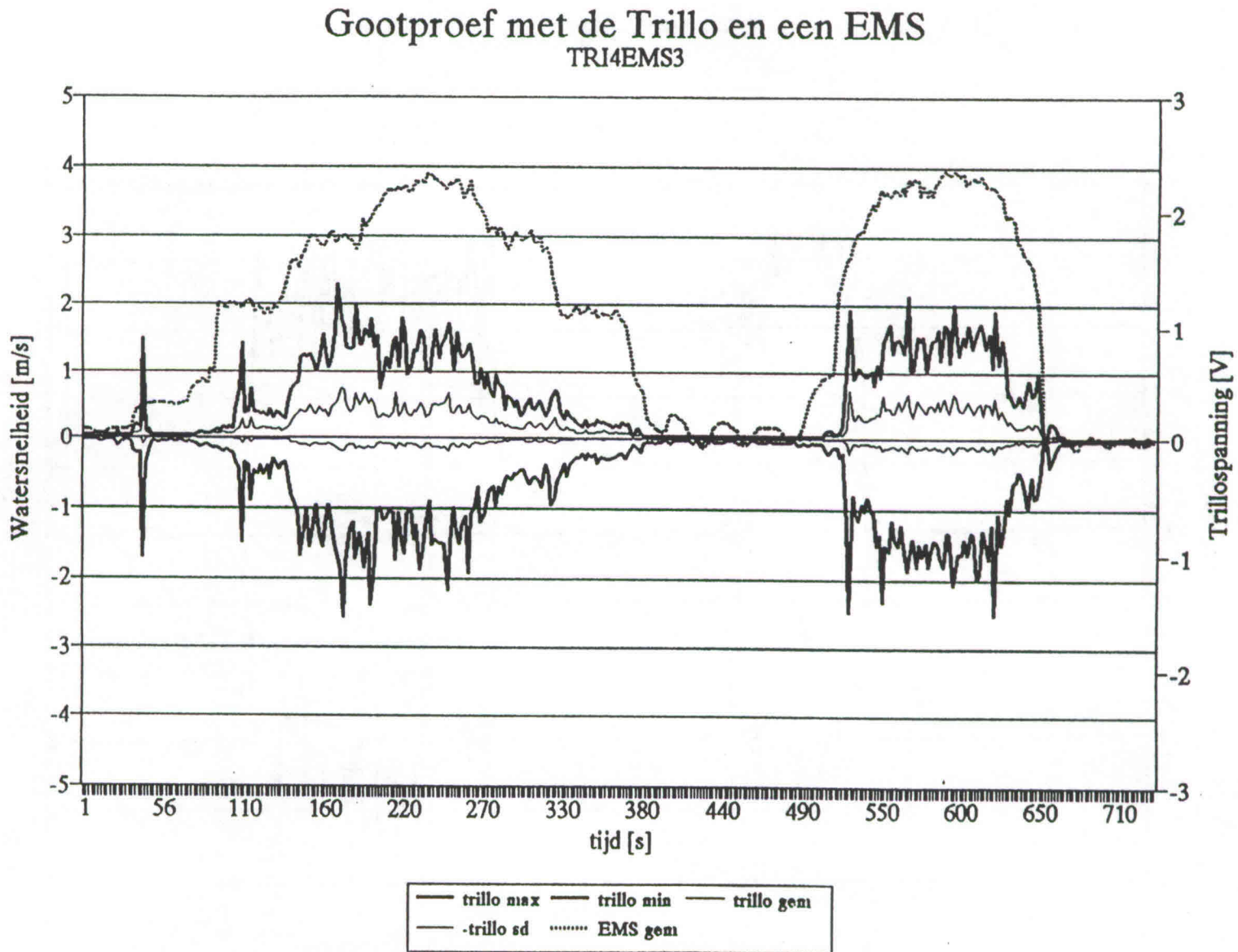
Gootproef met de Trillo en een EMS
TRI4EMS1



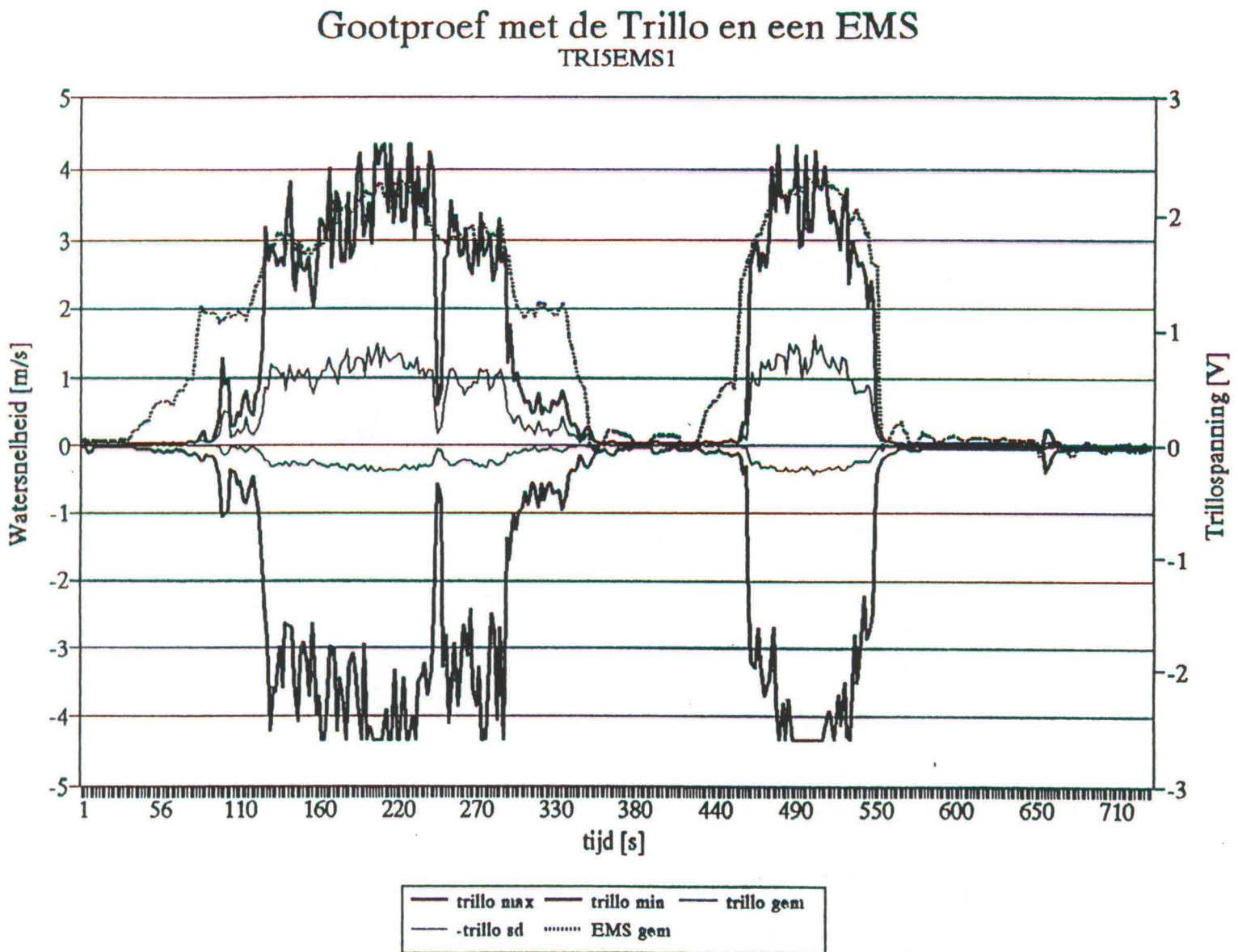
Figuur BII:4.2: Test 2 met configuratie 4



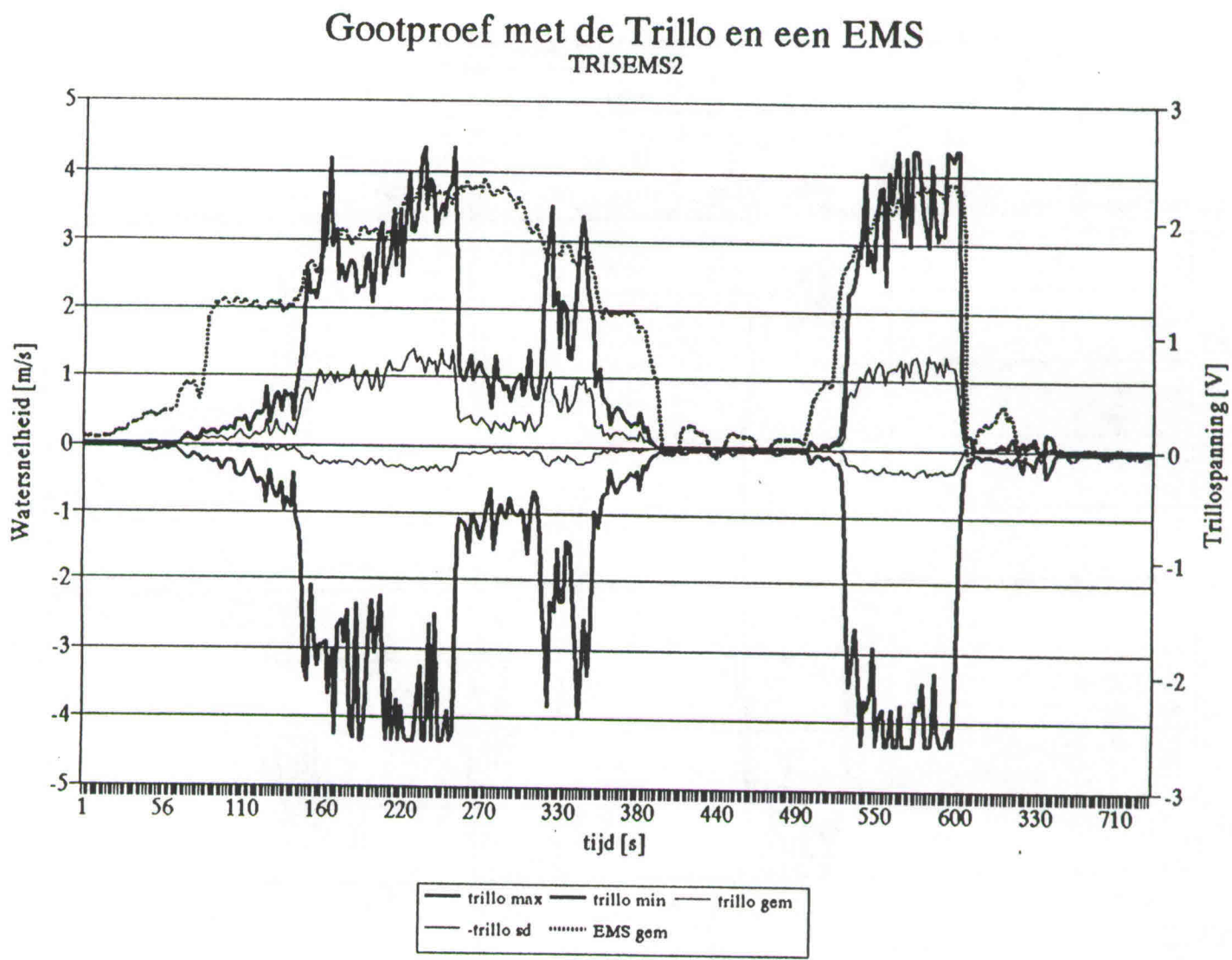
Figuur BII.4.3: Test 3 met configuratie 4



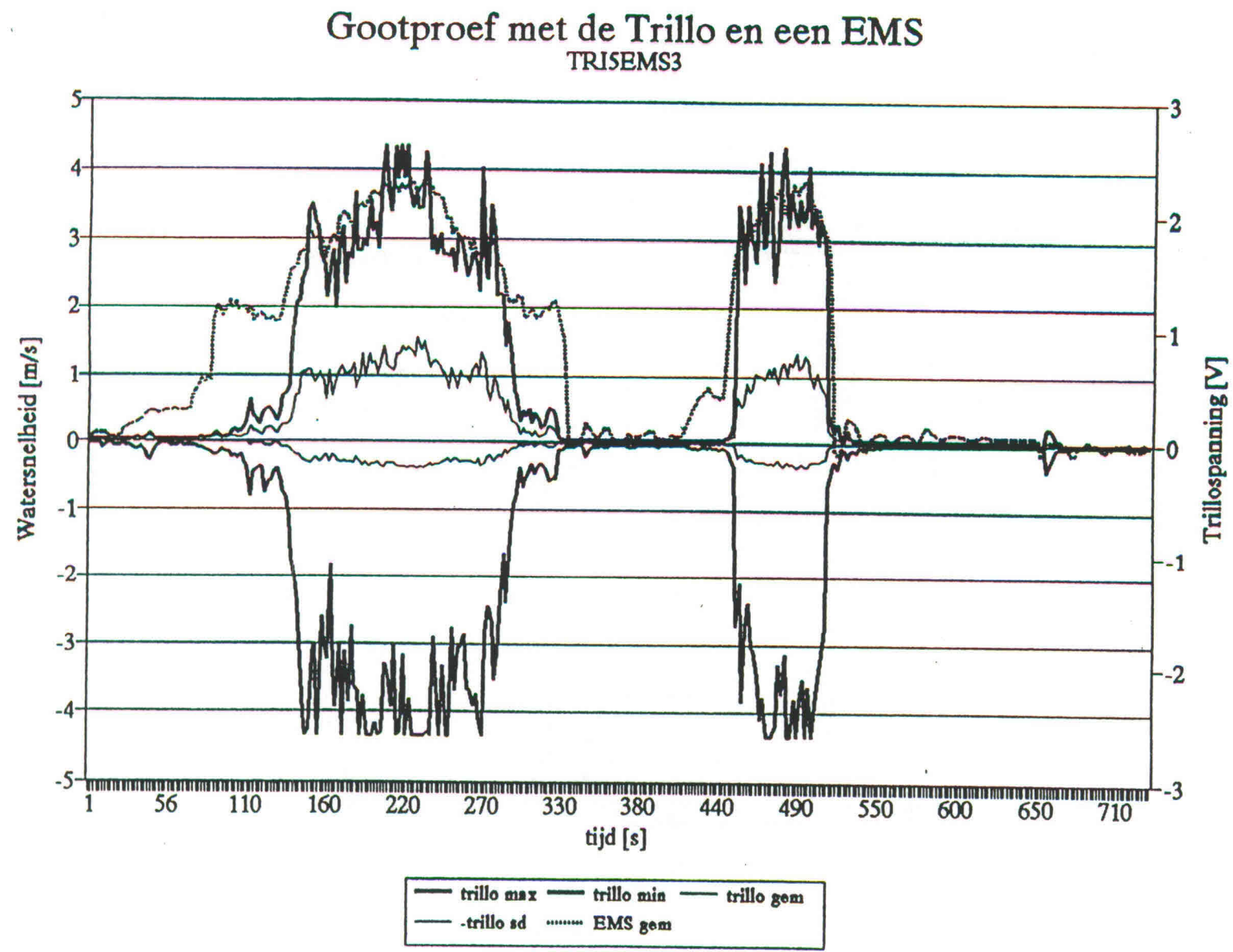
Figuur BII.5.1: Test 1 met configuratie 5



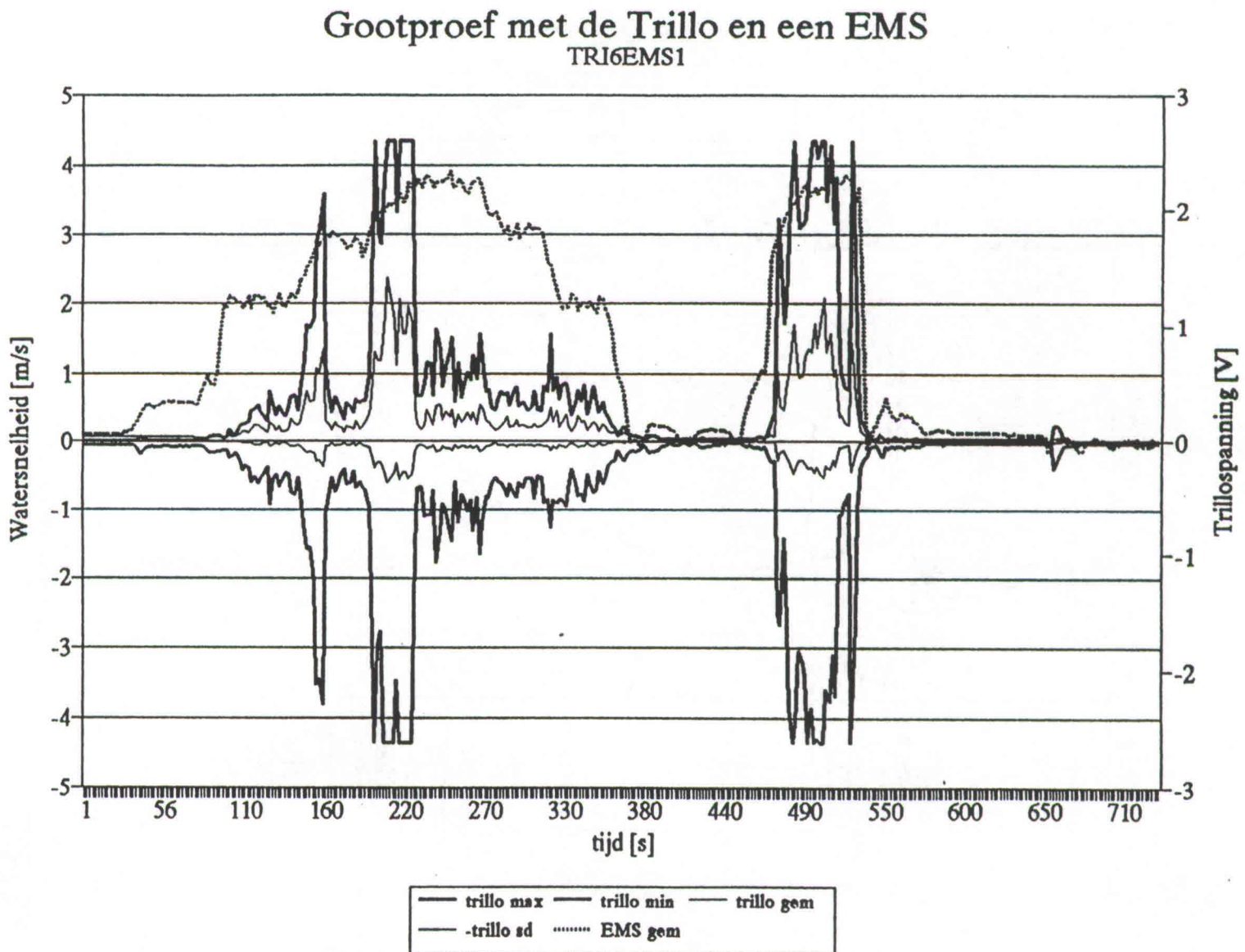
Figuur BII.5.2: Test 2 met configuratie 5



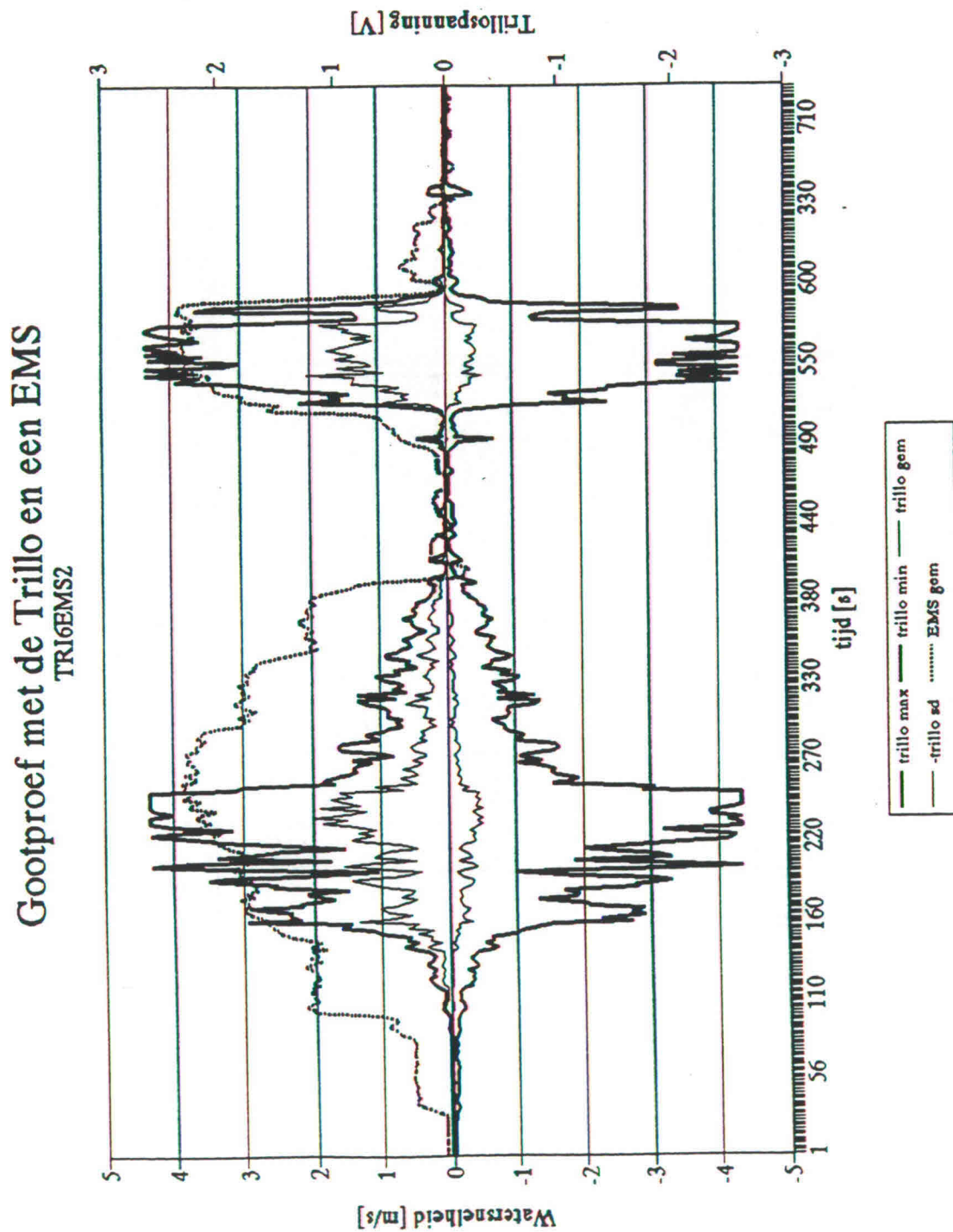
Figuur BII:5.3: Test 3 met configuratie 5



Figuur BII:6.1: Test 1 met configuratie 6



Figuur BII:6.2: Test 2 met configuratie 6



Figuur BII:6.3: Test 3 met configuratie 6

