

Bepalen van de oppervlakteruwheid van verf met behulp van een rotatie viscometer

Paepe Anne-Sophie

Scriptie voorgedragen tot het behalen
van de graad van
Master in de Nautische Wetenschappen
aan de Hogere Zeevaartschool

Promotor: Mr. Raf Meskens
Copromotor: Prof. Dr. Geert Potters

Academiejaar 2022-2023

Woord vooraf

Deze thesis is een wetenschappelijk onderzoek waarbij een alternatieve methode wordt onderzocht om de oppervlakteruwheid van coatings te bepalen. Dit onderzoek bouwt verder op mijn bachelor thesis, die meer inzicht bracht in de drijfveer voor deze alternatieve methode. In mijn bachelor thesis beschreef ik waarom er nood is aan een snellere en compactere methode en de toepassingen van dit onderzoek in de scheepvaartsector.

Deze onderzoeksmethode wordt uitgevoerd met behulp van een rotatieviscosimeter en drie cilinders met een verschillende oppervlakteruwheid. Deze cilinders zijn de spindels en zijn de meetinstrumenten van het toestel. Dergelijke proeven werden al eerder doorlopen met behulp van torsiemeters of coaxiale dubbele cilinder rotatieviscosimeters. Dit onderzoek is verschillend omdat een rotatieviscosimeter wordt gebruikt met één enkele cilinder.

Ik wil mijn dank betuigen aan mijn promotor, de heer Raf Meskens en mijn copromotor, Prof. Dr. Geert Potters. Ik wil ook graag mevrouw Katrijn Verhasselt bedanken, wiens kennis een grote hulp was. Ik wil hen bedanken voor hun advies, tijd, geduld en toewijding naar deze thesis. Ik bedank ook Benjamin Hendriks, mijn voorganger, die zich reeds is in dit onderzoek verdiepte. Zijn masterthesis was een bron van inspiratie en informatie om mijn eigen masterthesis tot een goed einde te brengen. Tot slot bedank ik mijn familie en vrienden voor hun steun en optimisme tijdens het schrijven van mijn masterthesis.

Samenvatting

In dit onderzoek wordt een snelle en compacte methode onderzocht om de oppervlakteruwheid van coatings te bepalen. Deze methode bestaat uit een rotatieviscosimeter met één enkele cilinder, die wordt gebruikt om de kinematische viscositeit te meten van een fluïdum. Het onderzoek werd doorlopen met drie spindels, die werden voorzien van een verschillende oppervlakteruwheid. In dit onderzoek werd de invloed van de weerstand bestudeert op de viscositeit en hieruit werd vervolgens een verband gehaald. De invloed van de weerstand werd onderzocht door de torsie te berekenen vanuit de viscositeitsmetingen. Het verband werd gelegd door de coëfficiënt van de torsie uit te zetten in functie van het Reynoldsgetal. Het doel van dit onderzoek is om na te gaan of deze alternatieve methode succesvol kan worden gebruikt in de toekomst.

Abstract

This research is a fast and compact method to determine the surface roughness of a coating. A single cylinder type rotational viscometer is used to measure the kinematic viscosity of a fluid. Three spindles were provided with different surface roughness's with a coating and blasting grit. In this research the impact of the resistance on the viscosity is monitored and a relation between these two components is derived. The effect of the resistance is studied by calculating the torque using the viscosity measurements. The relation is derived by showing the coefficient of the torque at different Reynolds numbers. The aim of this research is to check if this alternative method can successfully be used in the future.

Inhoudsopgave

| | |
|--|-----------|
| Woord vooraf | i |
| Samenvatting..... | ii |
| Lijst van figuren | vi |
| Lijst van tabellen..... | viii |
| Lijst van afkortingen | ix |
| Lijst van symbolen | x |
| Inleiding..... | 1 |
| 1 Theoretisch kader | 3 |
| 1.1 <i>Viscositeit</i> | 5 |
| 1.1.1 Newtoniaanse en niet-Newtoniaanse vloeistoffen | 9 |
| 1.2 <i>Stroming</i> | 12 |
| 1.2.1 De grenslaag | 14 |
| 1.2.2 Invloed van de oppervlakteruwheid in de grenslaag..... | 19 |
| 1.3 <i>De rotatieviscometer</i> | 21 |
| 1.3.1 De coëfficiënt van de torsie..... | 23 |
| 2 Materiaal en methode | 25 |
| 2.1 <i>Meetsysteem</i> | 25 |
| 2.1.1 Onderdelen..... | 26 |
| 2.1.2 Meetbereik | 30 |
| 2.1.3 Parameters | 32 |
| 2.1.3.1 Het fluïdum | 32 |
| 2.1.3.2 R1 spindel..... | 34 |
| 2.1.3.3 Snelheid..... | 37 |
| 2.1.3.4 Densiteit..... | 38 |
| 2.1.3.5 Temperatuur | 39 |
| 2.1.3.6 Percentage van de basisschaal..... | 41 |
| 2.2 <i>Meetmethode</i> | 42 |
| 3 Ruwheid | 46 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.1 | <i>Verf</i> | 46 |
| 3.2 | <i>Oppervlakteruwheidstester</i> | 49 |
| 3.2.1 | Meetsysteem..... | 49 |
| 3.2.2 | Ruwheidsparameters..... | 56 |
| 3.2.2.1 | Gemiddelde waarden van de amplitude..... | 56 |
| 3.2.2.2 | Pieken en dalen..... | 57 |
| 3.2.2.3 | Afstand parameters..... | 58 |
| 3.2.2.4 | Curven en parameters gerelateerd aan kansdichtheid..... | 59 |
| 3.3 | <i>Resultaten</i> | 61 |
| 4 | Experiment | 65 |
| 4.1 | <i>Testfluida</i> | 66 |
| 4.1.1 | Natriumchloride-oplossing..... | 66 |
| 4.1.2 | Waterige glycerineoplossingen..... | 67 |
| 4.1.2.1 | Glycerol..... | 67 |
| 4.1.2.2 | Water-glycerine mengsels..... | 69 |
| 4.2 | <i>Data en resultaten</i> | 73 |
| 4.2.1 | S_1 in de natriumchlorideoplossingen..... | 73 |
| 4.2.2 | S_1 , S_2 en S_3 in waterige glycerine oplossingen..... | 76 |
| 5 | Discussie | 88 |
| 6 | Conclusie | 93 |
| 7 | Bibliografie | 94 |

Lijst van figuren

| | | |
|------------------|--|----|
| Figuur 1 | HAAKE Viscotester D type R..... | 3 |
| Figuur 2 | Schuifspanning in een vaste stof vs. Fluidum | 5 |
| Figuur 3 | Schuifspanning in een vloeistof tussen twee oppervlakken | 6 |
| Figuur 4 | Definitie viscositeit | 8 |
| Figuur 5 | Stromingsgedrag Newtoniaanse vloeistof..... | 9 |
| Figuur 6 | Niet-Newtoniaanse en complexe vloeistoffen | 10 |
| Figuur 7 | Laminaire stroming in een leiding | 13 |
| Figuur 8 | Turbulente stroming in een leiding | 13 |
| Figuur 9 | De snelheidsgrenslaag | 15 |
| Figuur 10 | De laminaire vs. turbulente grenslaag..... | 16 |
| Figuur 11 | Snelheidsprofielen van een laminaire en turbulente stroming | 17 |
| Figuur 12 | De turbulente grenslaag..... | 18 |
| Figuur 13 | Wrijvingscoëfficiënt van een laminaire stroming vs. turbulente stroming..... | 19 |
| Figuur 14 | Rotatieviscosimeter: zij- en bovenaanzicht..... | 21 |
| Figuur 15 | Torsie in functie van verschillende oppervlakteruwheden | 23 |
| Figuur 16 | HAAKE viscotester D waterpas | 26 |
| Figuur 17 | Werking van de viscometer | 27 |
| Figuur 18 | Spindels..... | 27 |
| Figuur 41 | Afmetingen stijgbeugel..... | 29 |
| Figuur 42 | Opstelling viscositeitsmeting..... | 29 |
| Figuur 20 | R1 spindel | 34 |
| Figuur 40 | Afmetingen spindel R1 | 36 |
| Figuur 21 | Coaxiale cilinder viscometer met zijn meetinstrument | 36 |
| Figuur 22 | Go! Temp® Temperatuursensor | 39 |
| Figuur 23 | Schematische voorstelling van het meet-configuratiemenu | 42 |
| Figuur 24 | Schematische voorstelling van het meetscherm | 43 |
| Figuur 25 | Het ruwheidsprofiel..... | 50 |
| Figuur 26 | Mitutoyo Surf test SJ-310 Roughness tester | 50 |
| Figuur 27 | Profielen van de Surf test SJ-310..... | 53 |
| Figuur 28 | Drie ruwheidsprofielen..... | 54 |

| | | |
|------------------|--|----|
| Figuur 29 | Aandrijfeenheden meetinstrument SJ-310 | 55 |
| Figuur 30 | Definitie Ra en Rq | 57 |
| Figuur 31 | Definitie Rt en Rz | 57 |
| Figuur 32 | Definitie $R3z$ | 58 |
| Figuur 33 | Definitie Rp en Rv | 58 |
| Figuur 34 | Definitie Sm | 59 |
| Figuur 35 | Definitie Pc | 59 |
| Figuur 36 | Definitie Rk , Rpk en Rvk | 60 |
| Figuur 37 | Opstelling ruwheidstester | 61 |
| Figuur 38 | Ruwheidsmetingen op de $R1$ | 62 |
| Figuur 39 | ISO-comparator | 64 |
| Figuur 43 | Industriële toepassingen van glycerol | 68 |
| Figuur 44 | Theoretische viscositeit van water-glycerol mengsels..... | 72 |
| Figuur 45 | Viscositeit gemeten met spindel $S1$ in natriumchlorideoplossingen. | 73 |
| Figuur 46 | Dynamische viscositeit in functie van Re voor glyceroloplossing $M1$ | 82 |
| Figuur 47 | Dynamische viscositeit in functie van Re voor glyceroloplossing $M2$ | 82 |
| Figuur 48 | Dynamische viscositeit in functie van Re voor glyceroloplossing $M3$ | 83 |
| Figuur 49 | Dynamische viscositeit in functie van Re voor glyceroloplossing $M4$ | 83 |
| Figuur 50 | Dynamische viscositeit in functie van Re voor glyceroloplossing $M5$ | 84 |
| Figuur 51 | Torsiecoëfficiënt voor $S1$ in natriumchloride-oplossingen | 89 |
| Figuur 52 | Torsiecoëfficiënt voor $S1$, $S2$ en $S3$ in $M1$ | 89 |
| Figuur 53 | Torsiecoëfficiënt voor $S1$, $S2$ en $S3$ in $M2$ | 90 |
| Figuur 54 | Torsiecoëfficiënt voor $S1$, $S2$ en $S3$ in $M3$ | 90 |
| Figuur 55 | Torsiecoëfficiënt voor $S1$, $S2$ en $S3$ in $M4$ | 91 |
| Figuur 56 | Torsiecoëfficiënt voor $S1$, $S2$ en $S3$ in $M5$ | 91 |

Lijst van tabellen

| | | |
|-----------------|---|----|
| Tabel 1 | Specificaties Haake Viscotester D Type R | 25 |
| Tabel 2 | Maximum aangewezen viscositeit Haake Viscotester D type R | 31 |
| Tabel 3 | Viscositeit van zoetwater bij 3 temperaturen | 33 |
| Tabel 4 | Viscositeit van zeewater bij 3 temperaturen | 33 |
| Tabel 5 | Viscositeit van glycerine bij 3 temperaturen | 33 |
| Tabel 6 | Gegevens vermeld in het testrapport | 44 |
| Tabel 7 | Productspecificaties Mitutoyo Surftest® SJ-310 Surface Roughness Tester | 52 |
| Tabel 8 | De vier categorieën van parameters die ruwheid beschrijven | 56 |
| Tabel 9 | Voorstelling spindels | 62 |
| Tabel 15 | Samenstelling natriumchloride-oplossingen | 66 |
| Tabel 10 | Fysische eigenschappen van glycerol | 67 |
| Tabel 11 | Samenstelling van de water-glycerol mengsels | 69 |
| Tabel 12 | Dichtheid van de water-glycerol mengsels | 70 |
| Tabel 13 | Vries- en kookpunten van water-glycerine oplossingen | 71 |
| Tabel 14 | Theoretische viscositeit van water-glycerol mengsels | 71 |
| Tabel 16 | Viscositeitsmetingen natriumchloride oplossingen | 74 |
| Tabel 17 | Gemiddelde viscositeitwaarden S1 in natriumchloride-oplossingen | 76 |
| Tabel 18 | Viscositeitsmetingen in glyceroloplossing M1 | 77 |
| Tabel 19 | Viscositeitsmetingen in glyceroloplossing M2 | 78 |
| Tabel 20 | Viscositeitsmetingen in glyceroloplossing M3 | 79 |
| Tabel 21 | Viscositeitsmetingen in glyceroloplossing M4 | 80 |
| Tabel 22 | Viscositeitsmetingen in glyceroloplossing M5 | 81 |
| Tabel 23 | T-waarde voor water-glycerine oplossingen | 85 |
| Tabel 24 | T-toets voor water-glycerine oplossingen | 86 |
| Tabel 25 | Viscositeitwaarden S1, S2 en S3 in waterige glycerine oplossingen | 87 |

Lijst van afkortingen

| AFKORTING | DEFINITIE |
|------------------|---|
| RPM | Revoluties per minuut |
| OT | Onderdampingsteken |
| K | x 1 000 |
| M | x 1 000 000 |
| TTT | <i>Time to torque</i> |
| TTS | <i>Time to stop</i> |
| ISO | <i>International Organization for Standardization</i> |
| SAE | <i>Society of Automotive Engineers</i> |

Lijst van symbolen

| Symbol | Naam | Definitie/ omschrijving | SI- eenheid |
|------------|------------------------------------|--|------------------|
| Re | Reynoldsgetal | $Re = F_t/F_s$ | - |
| F_t | Traagheidskracht | Kracht die zorgt dat een voorwerp zijn bewegingstoestand behoudt | N |
| F_s | Viskeuze kracht | Kracht die stromingsweerstand van een fluïdum veroorzaakt | N |
| D | diameter | | m |
| ρ | Densiteit of dichtheid | $\rho = m/V$ | kg/cm^3 |
| v | snellheid | | m/s |
| η | Dynamische viscositeit | $\eta = \sigma/e$ | $Pa \cdot s$ |
| ν | kinematische viscositeit | $\nu = \eta/\rho$ | m^2/s of cSt |
| L | Lengte | | m |
| τ | schuifspanning | $\tau = F/A$ | N/m^2 |
| F | kracht | | N |
| A | oppervlakte | | m^2 |
| e | afschuifsnellheid | De snellheidsgradiënt of dv/dx | $1/s$ |
| $u(x, y)$ | Stromingssnellheid in de grenslaag | Stroming in de grenslaag, beïnvloedt door viskeuze krachten | m/s |
| U_∞ | Snellheid van de vrije stroming | Stroming die buiten de grenslaag vloeit en niet | m/s |

| | | | |
|----------|------------------------------|--|----------|
| | | wordt beïnvloed door viskeuze krachten | |
| δ | Dikte van de grenslaag | $\delta = 0,99 \cdot U_\infty$ | m |
| x | Afstand | De horizontale afstand van een punt tot het ijkpunt | m |
| C_f | Weerstandscoefficiënt | Grootheid die wordt gebruikt om de weerstand te beschrijven die een voorwerp ondervindt in een stromend medium | - |
| Re_x | | Reynoldsgetal in functie van de afstand tussen de <i>leading edge</i> en een lokaal punt op het voorwerp | - |
| ω | Hoeksnelheid | Afgeleide naar de tijd van de doorlopen hoek | Rad/s |
| C_m | Coëfficiënt van de torsie | Grootheid die wordt gebruikt om de torsie te beschrijven die de spindel ondervindt in een stromend medium | - |
| Re_R | | Reynoldsgetal in functie van de diameter van de spindel | - |
| S1 | | Blanke cilinder | |
| S2 | | Cilinder met Sigmacover™ 280 | |
| S3 | | Cilinder met Sigmacover™ 280 en straalgrit GH80 | |
| GH80 | Mesh-grootte | Aantal zeefdraden per oppervlakte-eenheid | $inch^2$ |

| | | | |
|-------------|---|--|-------------|
| T | Temperatuur | | $^{\circ}C$ |
| λ_c | Cutoff-lengte van het ruwheidsprofiel | 0,08 mm; 0,25 mm; 0,8 mm; 2,5 mm; 8 mm | μm |
| λ_s | Cutoff-lengte van het primair profiel | 2,5 μm ; 8 μm ; 25 μm | μm |
| λ_f | Cutoff-lengte van het golfprofiel | | μm |
| R_a | Gemiddelde ruwheid | Rekenkundig gemiddelde van de profielhoogten en -laagten | μm |
| R_q | Kwadratisch gemiddelde van R_a | Wortel-gemiddelde-kwadraatafwijking van R_a | μm |
| R_t | Maximale profielhoogte | Het verschil tussen de hoogste piek en het laagste dal | μm |
| R_{ti} | Maximale profielhoogte in één cutoff lengte | Verticale afstand tussen de grootste profielhoogte en -laagte | μm |
| R_z | Gemiddelde maximale profielhoogte | Rekenkundig gemiddelde van de R_{ti} waarden | μm |
| R_{3z} | | Rekenkundig gemiddelde van de op twee na grootste afstand tussen piek en dal | μm |
| R_p | Maximale piekhoogte | Verticale afstand tussen M en de hoogste piek | μm |
| R_v | Maximale dal diepte | Verticale afstand tussen M en het laagste dal | μm |

| | | | |
|------------|---|--|---------|
| <i>Sm</i> | Gemiddelde afstand tussen onregelmatigheden | Rekenkundig gemiddelde van de afstand tussen de profielonregelmatigheden | μm |
| <i>Pc</i> | Piek dichtheid | Aantal SAE pieken voor één steekproeflengte, | μm |
| <i>Rk</i> | Kernhoogte | | μm |
| <i>Rpk</i> | Verminderde piekhoogte | | μm |
| <i>Rvk</i> | Verminderde dal diepte | | μm |
| <i>M1</i> | | Water-glycerol mengsel met 24,0 wt% | |
| <i>M2</i> | | Water-glycerol mengsel met 45,7 wt% | |
| <i>M3</i> | | Water-glycerol mengsel met 65,4 wt% | |
| <i>M4</i> | | Water-glycerol mengsel met 83,4 wt% | |
| <i>M5</i> | | Water-glycerol mengsel met 99,5 wt% | |

Inleiding

Corrosie en de aangroei van biofouling op de scheepsromp verhogen de wrijvingsweerstand van een schip drastisch. De wrijvingsweerstand is de grootste component van de totale weerstand bij een schip dat zich voortstuwt door het water. In nieuwe en gestroomlijnde schepen met een lage snelheid is de wrijvingsweerstand goed voor 80% à 85% van de totale weerstand. Bij snelle schepen bedraagt de wrijvingsweerstand 50% van de totale weerstand (Howell & Behrends, 2006). Een verhoogde weerstand staat in de scheepvaart gelijk aan grote economische verliezen. Het toepassen van een antifouling coating op de scheepsromp is een afweer voor de aangroei van mariene organismen. Een efficiënte antifouling coating vermindert de toename van de wrijvingsweerstand aanzienlijk. Eerder onderzoek bewees dat 720 miljoen dollar aan brandstofkosten wordt bespaard door de gunstige invloed van een antifouling coating op de wrijvingsweerstand (Holm et al., 2004). Maar dergelijke coatings hebben ook een eigen oppervlakteruwheid die voor bijkomende wrijving zorgt. Een grote oppervlakteruwheid zal de hydrodynamische prestaties van een coating negatief beïnvloeden. Bij het ontwikkelen van nieuwe antifouling coatings tracht men de oppervlakteruwheid zo klein mogelijk te houden (Hendriks, 2020).

Het is moeilijk om data te verzamelen over de toestand van de scheepsromp bij schepen die in dienst zijn. Om die reden worden indirecte methoden gebruikt om de toename van de wrijvingsweerstand bij een coating te schatten. Er bestaan meerdere technieken om de wrijvingsweerstand van coatings te meten, namelijk sleeptanks, stroomcellen en ronddraaiende schijven. Testen in sleeptanks zijn doorgaans eenvoudig uit te voeren en leveren accurate resultaten op. Maar onderzoek in sleeptanks is tijdrovend en duur, daarbij zijn onderzoekers vaak gelimiteerd tot een snelheid van tien knopen. Het gebruik van roterende schijven heeft praktische voordelen. Het is namelijk sneller en compacter en de gebruiker kan de snelheid eenvoudig aanpassen. Wanneer de oppervlakteruwheid wordt gemeten met roterende schijven, gebeurt dit vaak met torsiemeters of coaxiale dubbele cilinder rotatieviscosimeters. In dit onderzoek wordt een rotatieviscosimeter gebruikt met één enkele cilinder, die door één gebruiker wordt bediend (Dennington et al., 2015).

Dit onderzoek tracht de efficiëntie van deze alternatieve methode te bewijzen. De rotatieviscosimeter berekent de viscositeit van een vloeistof door de torsie te meten op een ondergedompelde cilinder. In dit geval roteert de cilinder aan een constante snelheid in het fluïdum. De intentie is om de waarde van de torsie, uitgedrukt door de coëfficiënt van de torsie C_m , te berekenen vanuit de gemeten viscositeit. C_m is een maatstaf voor de weerstand die de cilinder ervaart. C_m wordt berekend voor drie verschillende oppervlakteruwheden, waardoor het verband tussen de weerstand en ruwheid kan worden onderzocht.

In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van de *HAAKE viscotester D*. In het eerste hoofdstuk worden de hydrodynamische principes gekaderd die toepasbaar zijn op de rotatieviscosimeter. De term viscositeit wordt besproken en de invloed van de oppervlakteruwheid hierop wordt toegelicht. Daarna wordt de werking van de *HAAKE viscotester D* beschreven en de parameters die van belang zijn tijdens het onderzoek. Ook de meetmethode wordt uitgebreid toegelicht in het tweede hoofdstuk. Het derde hoofdstuk verdiept zich in de *Mitutoyo Surf test SJ-310 Roughness tester* die wordt gebruikt om de oppervlakteruwheid van de spindels te meten. De metingen werden uitgevoerd met drie spindels met een verschillende oppervlakteruwheid: $S1$, $S2$ en $S3$. In het vierde hoofdstuk worden de testfluida besproken. Er werden twee soorten oplossingen gebruikt met verschillende dichtheden: *NaCl*-oplossingen en waterige glycerine oplossingen. Hierna volgen de meetresultaten voor de verschillende oplossingen en spindels en wordt de verzamelde data kort besproken. Als laatst worden de viscositeitsmetingen omgezet naar waarden voor de torsie. De torsie wordt uitgedrukt door C_m en wordt vergeleken voor de verschillende spindels, zo kan men zien wat de invloed is van de oppervlakteruwheid op de torsie en bijgevolg op de weerstand.

1 Theoretisch kader

In deze proefopstelling werd gebruik gemaakt van de Thermo Scientific HAAKE viscotester D, voorgesteld in **Figuur 1**. Dit is een rotatieviscosimeter dat adequaat is voor betrouwbare en snelle resultaten. Het toestel laat toe viscositeitsmetingen uit te voeren aan een lage afschuifsnelheid in een laminaire stroming. De rotatieviscosimeter is conform aan de norm ISO 2555 waardoor de verworven resultaten vergelijkbaar zijn met diverse onderzoeken die dezelfde norm hanteren (*ISO 2555, 2018*).



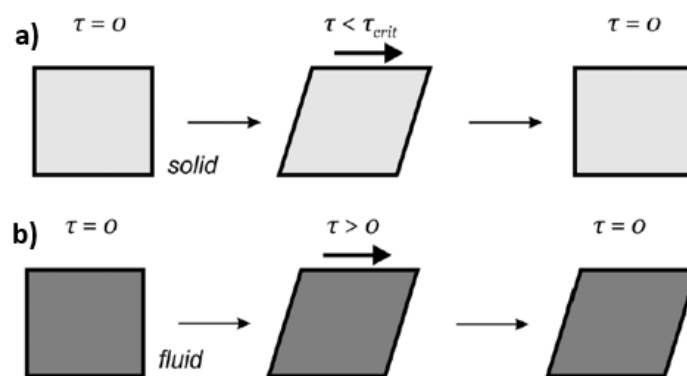
Figuur 1 HAAKE Viscotester D type R
Bron: HAAKETM ViscotesterTM E, D and C Rotational Viscometer, 2020

De rotatieviscosimeter bestaat uit een hoofdeenheid (A) met een afleesmodule (B), waarop de gebruiker de viscositeitswaarde kan aflezen. De gebruiker kan de instellingen aanpassen met behulp van het toetsenbord (C). Het toestel meet de viscositeit van een fluidum dat zich in een maatbeker bevindt onder de rotatieviscosimeter (D). De meetinstrumenten van het apparaat zijn de spindels (E), die in verschillende maten en vormen bestaan. Een spindel roteert in het fluidum en de viscosimeter meet de torsie die de spindel ervaart. Vervolgens wordt de torsie omgezet naar een viscositeitswaarde, die wordt afgebeeld op de afleesmodule. Viscosimeters worden doorgaans gebruikt om reologische eigenschappen van vloeistoffen, zoals viscositeit, te meten (*HAAKE Viscotester D - Instruction Manual, 2018*).

In dit onderzoek werd de rotatieviscosimeter gebruikt met een ander doel. De intentie van dit experiment is om te onderzoeken of de hydrodynamische weerstand van een verf kan bepaald worden met HAAKE viscotester D. De viscositeit van het fluidum waarin de metingen plaatsvinden is bij voorbaat gekend. Hier is de intentie om de torsie te berekenen met behulp van de verworven viscositeitswaarden (Hendriks, 2020).

1.1 Viscositeit

Viscositeit wordt gezien als de weerstand van een vloeistof tegen een vervorming gecreëerd door schuifspanning, voorgesteld door τ . Bij een vaste stof treedt er enkel vervorming op wanneer de kritische waarde voor de schuifspanning wordt overschreden. Bij een fluïdum is dit niet het geval, want daar veroorzaken kleine schuifspanningen al een verandering van gedaante. Hierdoor moet het medium op zoek gaan naar een nieuwe toestand van equilibrium. Dit wordt geïllustreerd in **Figuur 2**, waar a een vaste stof voorstelt en b een fluïdum (Mulder, 2011).



Figuur 2 Schuifspanning in een vaste stof vs. Fluïdum
Bron: Bewerkt van Rapp, 2017

De weerstand die een fluïdum biedt tegen vervorming wordt bepaald door de viskeuze krachten die aanwezig zijn in het fluïdum. Viskeuze krachten zijn het resultaat van intermoleculaire interacties. Deze krachten zorgen voor intermoleculaire wrijving en beïnvloeden de viskeuze eigenschappen van een fluïdum. Benzine heeft bijvoorbeeld een lage viscositeit door de zwakke intermoleculaire krachten tussen de moleculen. Benzine zal weinig weerstand bieden tegen een externe kracht. Honing daarentegen heeft een hoge viscositeit en zal minder snel uit zijn oorspronkelijke toestand vloeien (Rapp, 2017). De moleculen in een fluïdum zijn onderhevig aan cohesie krachten of vanderwaalskrachten en adhesie krachten. Tussen een vaste stof en een vloeistof zijn er adhesiekrachten aanwezig, waardoor de moleculen van een fluïdum blijven plakken aan het oppervlak. Tussen de moleculen onderling zijn cohesie krachten aanwezig, waardoor een stroming stapsgewijs wordt afgeremd (Rahman et al., 2014).

Door dit fenomeen treden differentiële stroomsnelheden op waardoor er vloeistoflagen ontstaan die zich in éénzelfde richting verplaatsen. Dit kan vergeleken worden met een dek kaarten. Als men de bovenste kaart verschuift, bewegen de onderste kaarten mee met een kleine vertraging. Elke kaart geeft momentum door aan de onderliggende kaart. Deze verschuiving is de vervorming of deformatie van een fluïdum. Het verband tussen de schuifspanning τ en de vervorming e is de viscositeit, voorgesteld in vergelijking (1). Viscositeit zorgt ervoor dat een vloeistof impuls overdraagt van de ene vloeistoflaag op de andere (Lachmann, 1961).

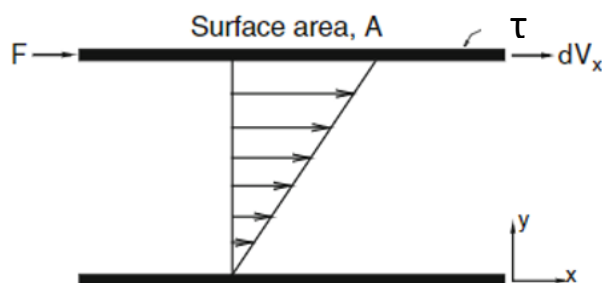
$$\eta = \frac{\tau}{e} \quad (1)$$

Waarbij:

τ Schuifspanning [N/m^2] (2)

e Afschuifsnelheid [$1/s$] (3)

Figuur 3 illustreert de schuifspanning die voorkomt in een fluïdum bij een constante temperatuur en druk. Een kracht F brengt een beweging teweeg in de bovenste plaat, wat gelijkaardig is aan de bovenste kaart van het dek in het bovenvermelde voorbeeld. De plaat beweegt met een snelheid v_x in dezelfde richting als kracht F . De vloeistoflaag die zich het dichtst bij de bovenste plaat bevindt, volgt de beweging van de plaat met een identieke snelheid v_x vanwege de adhesiekrachten tussen de vaste stof en het fluïdum. Dit staat bekend als de *no slip condition* omdat er geen relatieve beweging is tussen de wand en de aangrenzende vloeistoflaag (Doran, 2013).



Figuur 3 Schuifspanning in een vloeistof tussen twee oppervlakken
Bron: Bewerkt van Chhabra, 2010

De beweging van de bovenste plaat haalt het fluïdum uit zijn stabiele toestand. De kracht F wordt overgedragen via het oppervlak A (*Surface Area*) naar de vloeistof. Als de viscositeit van een vloeistof groot is, volgt de onderliggende laag met quasi dezelfde snelheid. Dit betekent dat de viskeuze krachten groot zijn en het momentum efficiënt wordt doorgegeven. In een vloeistof met lage viscositeit vindt er weinig impulsoverdracht plaats, wat leidt tot een groot snelheidsverschil tussen de vloeistoflagen (Rapp, 2017).

De onderste wand in **Figuur 3** is stationair: $v_0 = 0$. De *no slip condition* geldt ook voor de onderste wand, waardoor de onderste vloeistoflaag geen snelheid bezit. Door de relatieve beweging van twee oppervlakken met verschillende snelheden en de "no-slip condition" ontstaat er een schuifspanning τ in het fluïdum, wat resulteert in een geïnduceerde stroming (Rebout, 2022). Een dergelijke stroming tussen twee platen wordt beschreven door de Couette stroming. De pijlen tussen de twee wanden, te zien in **Figuur 3**, stellen het snelheidsprofiel van de stroming voor. Het snelheidsprofiel van deze stroming wordt gekarakteriseerd door parallelle vloeistoflagen met verschillende lineaire snelheden, die in éénzelfde richting bewegen (Dennington et al., 2015).

De schuifspanning τ wordt bekomen door de kracht F te delen door het contactoppervlak van de vloeistof A . De eenheid van τ is N/m^2 . In dit onderzoek werd de kracht F bepaald door de rotatiesnelheid van de spindel. De schuifspanning wordt uitgedrukt door vergelijking (2).

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2)$$

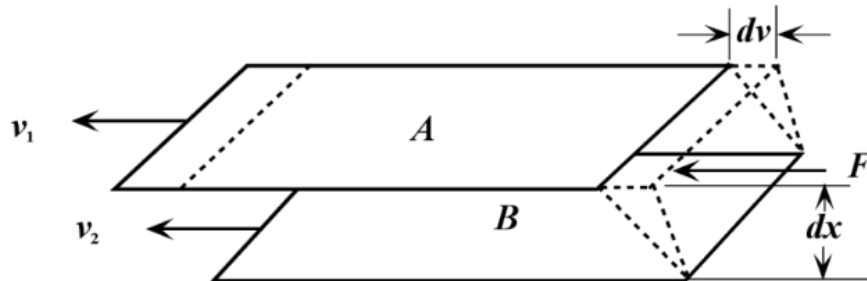
Waarbij:

F Kracht nodig om een vloeistoflaag in beweging te zetten [N]

A Contactoppervlak van de vloeistof [m^2]

De snelheid van een vloeistoflaag verandert lineair met de verticale afstand y , aangeduid door de y -as op **Figuur 3**. Dit is eigen aan het snelheidsprofiel, waardoor een vloeistoflaag die zich verder van de stationaire wand bevindt zich sneller voortplant.

De verticale afstand dx in functie van het snelheidsverschil tussen de lagen dv , wordt uitgedrukt door de snelheidsgradiënt $\frac{dv}{dx}$ en is te zien op **Figuur 4**. De snelheidsgradiënt is een maat voor de vervorming van de vloeistof (Chhabra, 2010).



Figuur 4 Definitie viscositeit
Bron: Viswanath et al., 2007

Een andere benaming voor de snelheidsgradiënt is de vervormingsnelheid of afschuifsnelheid e . De eenheid van de afschuifsnelheid is $1/s$. De afschuifsnelheid wordt berekend met vergelijking (3).

$$e = \frac{dv}{dx} \quad (3)$$

Waarbij:

dv Verschil in snelheid [m/s]

dx Afstand tussen vloeistoflaag en cilinderwand [m]

De uiteindelijke dynamische viscositeit η , uitgedrukt in [$Pa \cdot s$], is gelijk aan de verhouding tussen de schuifspanning en de afschuifsnelheid. Viscositeit is een intrinsieke materiaaleigenschap van een fluïdum en zal variëren naargelang de vloeistof (Rapp, 2017).

De kinematische viscositeit ν , uitgedrukt in m^2/s , wordt berekend door de dynamische viscositeit te delen door de dichtheid van het medium aan de juiste temperatuur en druk (Viswanath et al., 2007). Dit wordt berekend met vergelijking (4).

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (4)$$

Waarbij:

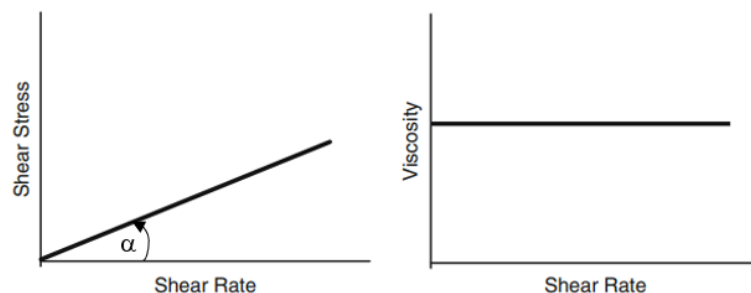
η Dynamische viscositeit [$Pa \cdot s$] (1)

ρ Dichtheid [g/cm^3]

1.1.1 Newtoniaanse en niet-Newtoniaanse vloeistoffen

Een vloeistof kan verschillende gedragingen vertonen. In dit onderdeel wordt een onderscheid gemaakt tussen Newtoniaanse fluïda en niet-Newtoniaanse fluïda.

Bij een Newtoniaans fluïdum bestaat er een lineair verband tussen de schuifspanning en de afschuifsnelheid. Als men alle waarden voor de schuifspanning en de vervormingssnelheid plot, wordt er één rechte door de oorsprong bekomen zoals voorgesteld in de linker grafiek van **Figuur 5**. Wanneer de dynamische viscositeit η hieruit wordt berekend, wordt de rechter grafiek van **Figuur 5** bekomen. De dynamische viscositeit is onafhankelijk van de afschuifsnelheid. Een Newtoniaans fluïdum wordt gekarakteriseerd door een constante viscositeit bij een éénzelfde temperatuur (George & Qureshi, 2013).



Figuur 5 Stromingsgedrag Newtoniaanse vloeistof

Bron: Bewerkt van George & Qureshi, 2013

Aan de linkerkant van **Figuur 5** ziet men een constante helling met hellingshoek α . Door het lineaire verband tussen de schuifspanning en de afschuifsnelheid, is het mogelijk om de dynamische viscositeit te berekenen met de hellingshoek α . Tussen de hellingshoek α en de viscositeit is een positieve correlatie. Naarmate de hellingshoek toeneemt, neemt ook de viscositeit toe. Daarentegen geldt dat bij een afnemende hellingshoek α , de viscositeit eveneens afneemt. De relatie tussen de dynamische viscositeit en de hellingshoek wordt voorgesteld in vergelijking (5) (Rouse, 2011).

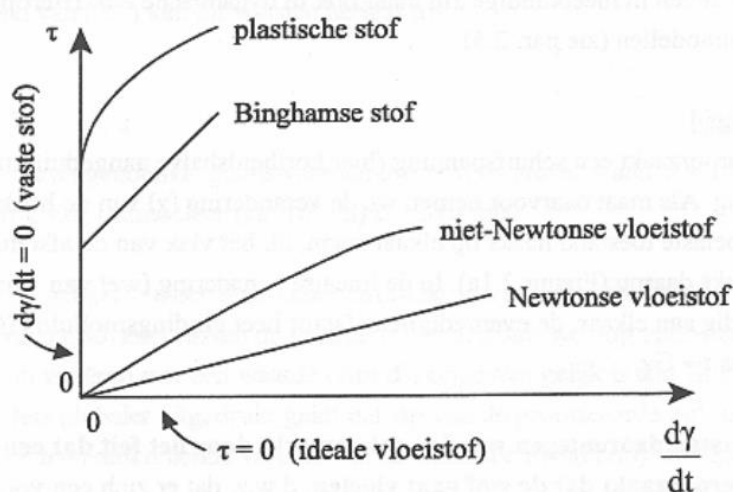
$$\eta = \tan \alpha \quad (5)$$

Waarbij:

η Dynamische viscositeit [$Pa \cdot s$] (1)

α Hellingshoek [$^{\circ}$]

Newtoniaanse vloeistoffen zijn uitzonderlijk. Vaker voorkomend zijn niet-Newtoniaanse vloeistoffen of complexe vloeistoffen. **Figuur 6** illustreert de relatie tussen de schuifspanning (γ -as) en de afschuifsnelheid (x -as) voor een Newtoniaans fluïdum, een niet-Newtoniaans fluïdum, een plastische stof en een Binghamse stof. De onderste rechte op **Figuur 6** is een Newtoniaans fluïdum met daarboven een kromme die een niet-Newtoniaanse fluïdum voorstelt. De dynamische viscositeit van een niet-Newtoniaanse vloeistof is niet constant, maar afhankelijk van de afschuifsnelheid of schuifspanning. Dergelijke vloeistoffen worden vaster of vloeibaarder wanneer de kracht F toeneemt. Voorbeelden van niet-Newtoniaanse fluïda zijn bloed, latexverf, margarine en mosterd (Chhabra, 2010).



Figuur 6 Niet-Newtoniaanse en complexe vloeistoffen
Bron: Mulder, 2011

Een Binghamse vloeistof toont een lineair verband op **Figuur 6**, maar start niet vanuit de oorsprong. Deze fluïda tonen een schuifspanning τ_0 , zonder enige vervorming of inwerkende kracht F . Indien een spanning in het fluïdum heerst die lager is dan τ_0 , zal het fluïdum zich gedragen als een vaste stof.

Omgekeerd, indien $\tau > \tau_0$ zal het fluïdum zich als een Newtoniaanse vloeistof gedragen. Een Binghamse vloeistof is viscoplastisch, wat betekent dat de vervorming van dit medium afhankelijk is van de snelheid waarmee het wordt belast. Een voorbeeld van dit viscoplastisch materiaal is klei of pindakaas (Van Canneyt & Verdonck, 2014).

De bovenste kromme op **Figuur 6** toont een plastische stof, die niet uit de oorsprong start en geen lineair verband toont. Hier geldt dezelfde regel als voor een Binghamse stof, waarbij het fluïdum zich als een vloeistof gedraagt als τ_0 overschreden wordt. Daarbij zal de vloeistof minderen in viscositeit wanneer de schuifspanning toeneemt. Als de schuifspanning kleiner is dan τ_0 gedraagt het fluïdum zich als een vaste stof. Voorbeelden van plastische vloeistoffen zijn modder en boorvloeistoffen. De y -as stelt een vaste stof voor (Mulder, 2011).

Bij bovenvermelde vloeistoffen zal de snelheidsgradiënt verschillen naargelang de positie op de spindel. Bij metingen in complexe vloeistoffen spreken we niet van de ware viscositeit, maar van de schijnbare viscositeit. Viscositeitsmetingen in een niet-Newtoniaans of complex fluïdum worden altijd inclusief rotatiesnelheid en cilinderomvang vermeld. Zo niet, zijn deze waarden onbruikbaar (ISO 2555, 2018).

In dit onderzoek worden metingen afgenomen in water, natriumchloride-oplossingen en waterige glycerineoplossingen. Water en glycerine zijn Newtoniaanse vloeistoffen en worden bijgevolg niet beïnvloed door de rotatiesnelheid van het toestel. We spreken hier altijd over de ware viscositeit van deze Newtoniaanse vloeistoffen. Andere voorbeelden van een Newtoniaanse vloeistof zijn lucht en kwik (Doran, 2013).

1.2 Stroming

In de vloeistofmechanica worden algemeen twee stromingen onderscheiden: de turbulente stroming en de laminaire stroming. Een laminaire stroming is een vlotte en gelijkmatige stroming. Het stromingspatroon bestaat uit gelijkmatig verdeelde parallelle lagen die zich in éénzelfde richting verplaatsen. Een turbulente stroming is een rommelige, instabiele stroming met veel onregelmatigheden. Deze stroming wordt gekarakteriseerd door willekeurige variaties in plaatselijke snelheden en druk. Een turbulent fluïdum stroomt in draaiende bewegingen met wervelstromen en kleine draaikolken (Gupta, 2014).

Het verschil tussen een laminaire en een turbulente stroming wordt bepaald door het dimensieloze getal van Reynolds. Een laminaire stroming in een pijp heeft een Reynoldsgetal dat lager is dan 2000. Bij een turbulente stroming in een pijp is het Reynoldsgetal groter dan 4000. Tussen deze twee waarden bevindt het fluïdum zich in een transitie zone, waar beide stromingen samen voorkomen (Malik et al., 2008). In een rotatieviscosimeter wordt een kritisch Reynoldsgetal gedefinieerd waarop deze transitie plaatsvindt. Een eerder onderzoek met dit kritisch Reynoldsgetal voor draaiende schijven rond 325. Hier ligt het transitiepunt duidelijk lager dan in een pijp. Dit is te wijten aan de ronddraaiende bewegingen in de vloeistof, waardoor er sneller kleine wervelstromen ontstaan (Dmitrenko, 2021).

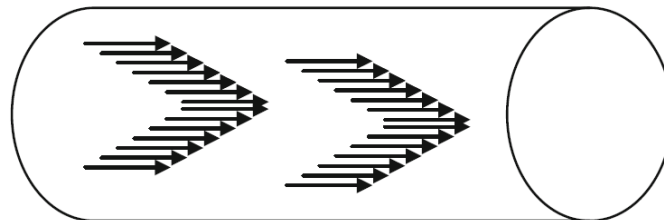
Het Reynoldsgetal is de verhouding tussen de viskeuze krachten en de traagheidskrachten in een fluïdum, weergegeven in vergelijking (6). De viskeuze krachten werden reeds beschreven in hoofdstuk 1.1. De traagheidskrachten geven de inertie weer van een fluïdum in beweging. Met andere woorden, wanneer een fluïdum in beweging is, wilt het in beweging blijven. Het Reynoldsgetal kan geïnterpreteerd worden als het verband tussen de snelheid van een fluïdum en zijn viscositeit (Viswanath et al., 2007).

$$Re = \frac{F_t}{F_s} \quad (6)$$

Waarbij:

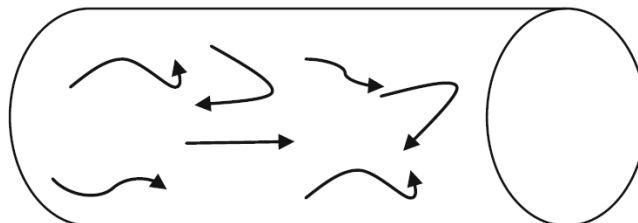
| | |
|-------|----------------------|
| Re | Reynoldsgetal |
| F_t | Traagheidskracht [N] |
| F_s | Viskeuze kracht [N] |

Figuur 7 stelt een laminaire stroming voor in een leiding, waar de viskeuze krachten domineren. Een laminaire stroming komt voor bij vloeistoffen met een hoge viscositeit of een lage snelheid (Gupta, 2014).



Figuur 7 Laminaire stroming in een leiding
Bron: Gupta, 2014

Figuur 8 toont een turbulente stroming door een leiding. Hier domineren de traagheidskrachten boven op de viskeuze krachten, waardoor het Reynoldsgetal groter is. Een turbulente stroming ontstaat bij een hoge snelheid of bij vloeistoffen met een lage viscositeit. De wervelstromen in de stroming kunnen aanzienlijk verschillen in grootte. Het merendeel van de stromingen zijn turbulent (Rouse, 2011).



Figuur 8 Turbulente stroming in een leiding
Bron: Gupta, 2014

Bij stromingen in leidingen wordt het Reynoldsgetal berekend met vergelijking (7). Hier kan opnieuw worden vastgesteld dat zowel de snelheid v als de viscositeit η een belangrijke invloed uitoefenen op de grootte van het Reynoldsgetal. Ook de diameter van de leiding beïnvloedt het Reynoldsgetal. Een leiding met een smalle diameter resulteert in een laag Reynoldsgetal en bijgevolg een laminaire stroming. Een turbulente stroming komt eerder voor in een pijp met grote diameter.

$$Re = \frac{D \cdot \rho \cdot v}{\eta} \quad (7)$$

Waarbij:

- D Diameter van de leiding [m]
- ρ Dichtheid van het fluidum [kg/m^3]
- v Stromingssnelheid [m/s]
- η Dynamische viscositeit van de vloeistof [$Pa \cdot s$] (1)

Indien een stroming over een vlakke plaat vloeit, wordt het Reynoldsgetal berekend met vergelijking (8). Merk op dat de kinematische viscositeit is gelijk aan de dynamische viscositeit gedeeld door de dichtheid van het fluidum (Vergelijking (4)).

$$Re = \frac{L \cdot v}{\nu} \quad (8)$$

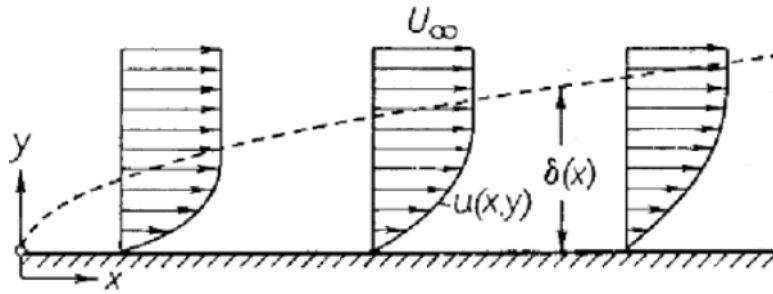
Waarbij:

- L Lengte van de plaat [m]
- v Stromingssnelheid [m/s]
- ν Kinematische viscositeit van de vloeistof [m^2/s] (4)

In vergelijking (8) stelt men vast dat het Reynoldsgetal wordt beïnvloed door drie factoren: de snelheid, de lengte van de vlakke plaat en de viscositeit. Een grotere snelheid gaat gepaard met een hoger Reynoldsgetal en bijgevolg ontstaat er meer turbulentie in het medium. Een hogere viscositeit staat gelijk aan een lager Reynoldsgetal. Een turbulente stroming zal ontstaan wanneer de stromingssnelheid te groot is in relatie tot de viscositeit (Trinh, 2010).

1.2.1 De grenslaag

Wanneer een stroming over een voorwerp vloeit wordt het afgeremd door de viskeuze wrijvingskrachten. Hierdoor vermindert de lokale stromingssnelheid dicht bij de wand van het voorwerp. Dit fenomeen komt voor in de grenslaag, voorgesteld door **Figuur 9** (Lachmann, 1961).



Figuur 9 De snelheidsgrenslaag
Bron: Lachmann, 1961

Het lineaire snelheidsprofiel van de grenslaag wordt voorgesteld door $u(x, y)$. De snelheden van de vloeistoflagen nemen verticaal toe tot ze de snelheid U_∞ bereiken. U_∞ is de snelheid van de ongestoorde stroming buiten de grenslaag en wordt ook de *free surface boundary condition* genoemd. Hier vindt er geen impulsoverdracht meer plaats tussen de moleculen, waardoor er buiten de grenslaag geen schuifspanning aanwezig is: $\tau = 0$. Daar wordt de stroming niet meer beïnvloed door het voorwerp. Deze grenslaag is gerelateerd aan de snelheid van de stroming U_∞ en heet de snelheidsgrenslaag (Rapp, 2017).

De dikte van de grenslaag neemt toe in de y -richting tot 99% van U_∞ is bereikt. Dit wordt gesymboliseerd door $\delta(y)$ en wordt voorgesteld in vergelijking (9). Wanneer de ongestoorde stroming wordt gekenmerkt door een hoge snelheid U_∞ , is het verschil met de *no-slip boundary condition* significant. Hierdoor zal de zone waar vervorming optreedt ook aanzienlijk toenemen, wat leidt tot de vorming van een dikkere grenslaag. Omgekeerd zal een tragere stroming een dunnere grenslaag tot stand brengen (Schetz & Bowersox, 2011).

$$\delta = 0,99 \cdot U_\infty \quad (9)$$

Waarbij:

δ Dikte van de grenslaag

U_∞ Snelheid van de stroming die niet wordt beïnvloed door schuifspanning

Een turbulente stroming verplaatst zich met een grotere snelheid U_∞ , waardoor de stroming meer momentum bezit.

In een turbulente stroming vindt meer impulsoverdracht plaats tussen de moleculen en de stroming zal zich meer gaan uitzetten in de y -richting. Algemeen geldt dat bij een lager Reynoldsgetal, een dunnere grenslaag ontstaat (Carlton, 2019).

De x -as duidt aan hoe ver de stroming zich van het beginpunt van de plaat of het voorwerp bevindt. De dikte van de grenslaag $\delta(x)$ neemt toe naarmate de afstand x vergroot. De viscositeit laat zich meer voelen naarmate de stroming zich over het oppervlak voortbeweegt, waardoor de vloeistoflagen harder worden afgeremd. Bij een viskeus fluïdum is $\delta(x)$ groter, omdat de vervorming van een viskeuze vloeistof veel groter is (Rouse, 2011).

Het Reynoldsgetal bepaalt of de stroming in de grenslaag laminaire of turbulent is. In de grenslaag wordt het Reynoldsgetal ook beïnvloed door de afstand x . Dit is gelijkaardig aan de lengte van een vlakke plaat in vergelijking (8). Het Reynoldsgetal in de grenslaag wordt berekend met vergelijking (10) (Schetz & Bowersox, 2011).

$$Re = \frac{U_{\infty} \cdot x}{\nu} \quad (10)$$

Waarbij:

- Re Reynoldsgetal
- U_{∞} Snelheid van de stroming buiten de grenslaag [m/s]
- ν Kinematische viscositeit [m^2/s] (4)
- x Afstand tussen beginpunt en punt op de plaat

Figuur 10 onderscheidt een laminaire grenslaag (links) en een turbulente grenslaag (rechts). Beide grenslagen hebben een verschillend snelheidsprofiel (Lachmann, 1961).

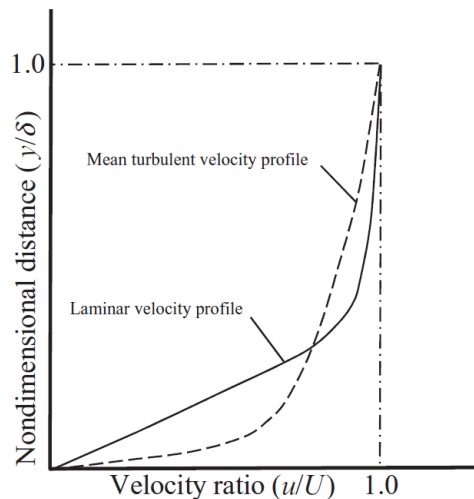


Laminaire grenslaag

Turbulente grenslaag

Figuur 10 De laminaire vs. turbulente grenslaag
Bron: Bewerkt van 'Basic Boundary Layer Theory', 2021

Figuur 11 bespreekt de snelheidsprofielen van stromingen over een vlakke plaat, waarbij de snelheidsgradiënt is uitgezet op de x -as en de dikte van de grenslaag $\delta(y)$ op de y -as. De volle lijn is het snelheidsprofiel van de laminaire stroming (*Laminar velocity profile*) en de stippellijn is het snelheidsprofiel van de turbulente stroming (*Mean turbulent velocity profile*) (Carlton, 2019).

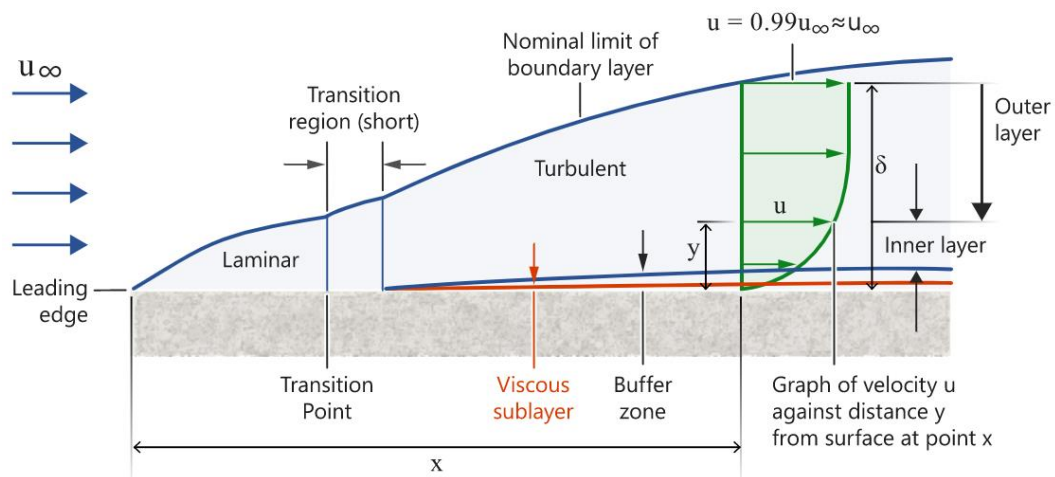


Figuur 11 Snelheidsprofielen van een laminaire en turbulente stroming
Bron: Carlton, 2019

In het eerste deel van de laminaire stroming neemt de snelheidsgradiënt lineair toe met de afstand $\delta(y)$. Dit toont aan dat de laminaire stroming zich ontbindt in parallelle vloeistoflagen, waarvan de snelheid gradueel toeneemt. De turbulente stroming ondervindt grote veranderingen in de snelheidsgradiënt dicht bij de wand. Dit komt door grote schuifspanningen die de turbulente stroming meer doen afremmen. De schuifspanning van een turbulente stroming is groter dan bij een laminaire stroming, waardoor de plaat meer weerstand ervaart.

Nadat de turbulente stroming sterk wordt vertraagd dichtbij de wand, neemt de snelheidsgradiënt verder van de wand nog in mindere mate toe. De snelheid van de stroming is daar veel constanter. Deze situatie kan worden toegeschreven aan de aanwezigheid van talrijke wervelstromen in de stroming, die zorgen voor een continue vermenging. In het algemeen geldt dat een turbulente stroming meer stromingsweerstand ervaart en minder vlot over een oppervlak stroomt dan de laminaire stroming (Rouse, 2011).

Figuur 12 toont een turbulente grenslaag, waarbij de stroming over een vlakke plaat vloeit met snelheid U_∞ . Bij het raakpunt met de plaat (*Leading edge*) neemt de snelheid af naar 0, om daarna terug te versnellen. Doordat de snelheid is afgenomen, begint de stroming over de plaat als een laminaire stroming (*Laminar*). Wanneer de afstand x toeneemt verandert de stroming naar een turbulente stroming (*Turbulent*). De overgang van een laminaire stroming naar een turbulente stroming gebeurt in de transitie zone (*Transition region*), beginnend bij het transitiepunt (*Transition Point*). Er is een duidelijke scheiding tussen de rommelige turbulente stroming en de vrije stroming U_∞ (*Nominal limit of boundary layer*) (Rebout, 2022).



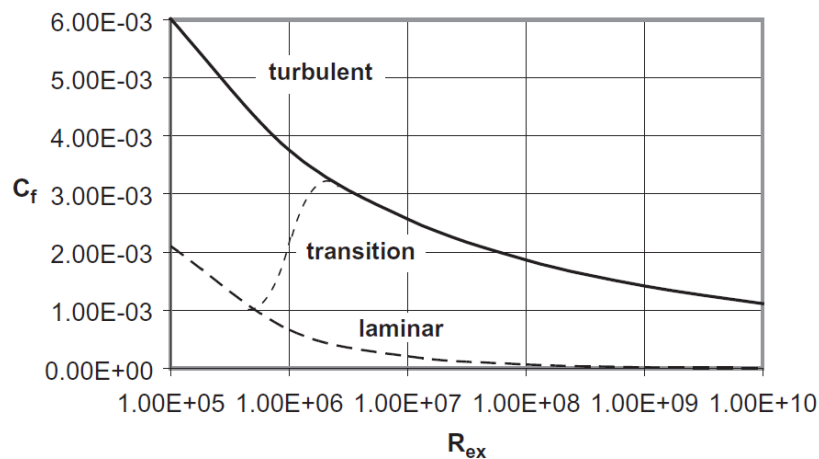
Figuur 12 De turbulente grenslaag
Bron: 'Basic Boundary Layer Theory', 2021

Figuur 12 onderscheidt drie delen in de turbulente stroming van de grenslaag, met een totale dikte δ . Het onderste deel van de grenslaag is de laminaire of viskeuze sublaag in de *no-slip condition* (*Viscous sublayer*), hier is de stroming grotendeels laminair en domineren viskeuze schuifspanningen. Boven op de viskeuze sublaag bevindt zich het binnenste deel van de turbulente grenslaag met dikte y (*Inner layer*). In dit deel zit een turbulente stroming waar ongelijkmatigheden en storingen domineren. De viskeuze sublaag vermengt zich met het binnenste deel van de grenslaag in een bufferzone (*Bufferzone*). Het buitenste deel van de grenslaag bevindt zich het verst van de wand en wordt beïnvloed door de onverstoorte stroming U_∞ buiten de grenslaag (*Outer layer*). Hier domineren turbulente schuifspanning met veel wervelstromen (Danvin & Jullien, 2017).

1.2.2 Invloed van de oppervlakteruwheid in de grenslaag

Het verband tussen de schuifspanning en de wrijvingscoëfficiënt is te vinden in de grenslaag. De oppervlakteruwheid verhoogt de wrijvingsweerstand en heeft bijgevolg een negatieve invloed op de hydrodynamische prestaties (Danvin & Jullien, 2017). Ruwheid veroorzaakt een verlies van momentum, waardoor de parallelle vloeistoflagen sneller worden verstoord door de ruwheidselementen. Door de ruwheidselementen in het oppervlak worden kleine wervelstromen gevormd nabij de wand, waardoor de dikte van de grenslaag toeneemt en het voorwerp bijgevolg meer weerstand ervaart (Schetz & Bowersox, 2011). Er ontstaat een recirculatie van de stroming bij elk ruwheidselement dat de stroming nabij tegenkomt. Wanneer deze onregelmatigheden in het oppervlak veelvuldig aanwezig zijn, zal de laminaire grenslaag sneller overslaan naar een turbulente grenslaag (Wu & Piomelli, 2018).

In de turbulente grenslaag zijn grotere schuifspanning aanwezig, die zorgen voor meer weerstand. In **Figuur 13** wordt de wrijvingscoëfficiënt C_f uitgezet op de y -as in functie van het Reynoldsgetal op de x -as. Het Reynoldsgetal R_{ex} is vermeld in functie van de afstand x , wat gelijk staat aan de afstand tussen de *leading edge* en een lokaal punt op het voorwerp.



Figuur 13 Wrijvingscoëfficiënt van een laminaire stroming vs. turbulente stroming
Bron: Sforza, 2014

Figuur 13 bevestigt dat C_f voor een turbulente stroming groter is dan voor een laminaire stroming. De transitie van laminair naar turbulent vindt plaats wanneer het Reynoldsgetal toeneemt, aangeduid door de lichte stippellijn (Sforza, 2014).

Een hoger Reynoldsgetal zorgt dat de invloed van de ruwheidselementen op de viscositeit groter wordt (Schultz & Myers, 2003).

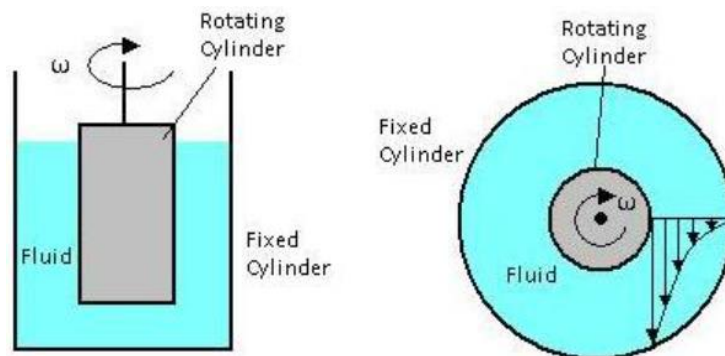
In dit onderzoek wordt de coëfficiënt van de wrijvingsweerstand C_f niet berekend, maar de coëfficiënt van de torsie C_m . Doordat er verschillende oppervlakteruwheden worden gemeten, bekomen we verschillende viscositeitsmetingen voor éénzelfde rotatiesnelheid en medium. Hierdoor kan de torsie gebruikt worden als een maatstaf voor de weerstand die de spindel ervaart (Dennington et al., 2021).

1.3 De rotatieviscometer

De HAAKE viscotester D kan opgedeeld worden in twee delen: een intern roterend gedeelte (spindel) en een extern stilstaand gedeelte waar het fluïdum zich in bevindt (maatbeker) (Radhakrishnan et al., 2018). Om een bepaalde snelheid te behalen, moet de spindel de weerstand van het fluïdum overwinnen. Door de viskeuze krachten loopt de spindel vertraging op ten opzichte van de motor (Schneidkraut et al., z.d.). Tussen de spindel en de motor is een spiraalveer gemonteerd, die deze vertraging mogelijk maakt. Het toestel meet de hoekafwijking tussen de motor en de spindel als maatstaf voor de torsie (ISO 2555, 2018).

De torsie is evenredig met de kracht die de cilinder nodig heeft om de weerstand van het fluïdum te overwinnen. Indien de spindel in een hoog viskeus fluïdum roteert, zoals ketchup of glycerine, zal de rotatieviscosimeter meer kracht nodig hebben om dezelfde snelheid te halen als in een laag viskeus fluïdum, zoals water. Algemeen geldt: hoe groter de torsie, hoe hoger de viscositeitswaarde (Kurkin et al., 2020).

Op **Figuur 14** wordt het zijaanzicht van een rotatieviscosimeter links voorgesteld en het bovenaanzicht rechts. In het midden van de maatbeker bevindt zich de roterende spindel (*Rotating Cylinder*) die een meting uitvoert in een vloeistof (*Fluid*). De buitenste cilinder is de stationaire maatbeker (*Fixed Cylinder*). De spindel draait enkele minuten rond haar as met een constante hoeksnelheid ω om een stroming te creëren. Op het bovenaanzicht wordt de stroming voorgesteld die wordt aangedreven door de schuifspanning als gevolg van de roterende cilinder (Heuzé et al., 2014).



Figuur 14 Rotatieviscosimeter: zij- en bovenaanzicht
Bron: Schneidkraut et al., z.d.

In **Figuur 14** bevindt het fluïdum zich tegen beide wanden in een *no-slip conditie*. De snelheid tegen de stationaire wand is gelijk aan 0 en de snelheid tegen de roterende spindel is gelijk aan de spindelsnelheid (Schetz & Bowersox, 2011). Tussen de twee wanden ontstaat het lineaire snelheidsprofiel van de Couette stroming. Op **Figuur 14** bevindt het fluïdum zich volledig in de grenslaag. Dit is mogelijk wanneer de afstand tussen de twee cilinders klein is. Dit is het geval wanneer men een coaxiale cilinder viscosimeter, ook wel bekend als een Couette type viscosimeter, gebruikt. Bij onderzoek naar wrijvingsweerstand en oppervlakteruwheid met rotatieviscosimeters wordt de coaxiale cilinder viscosimeter regelmatig gebruikt. Experimenten met deze viscosimeter hebben al tot succesvolle resultaten geleid in diverse onderzoeken naar antifouling en fouling-release coatings ((Weinell et al., 2003), (Dennington et al., 2015), (Holm et al., 2004), (Mieno & Katsui, 2020)).

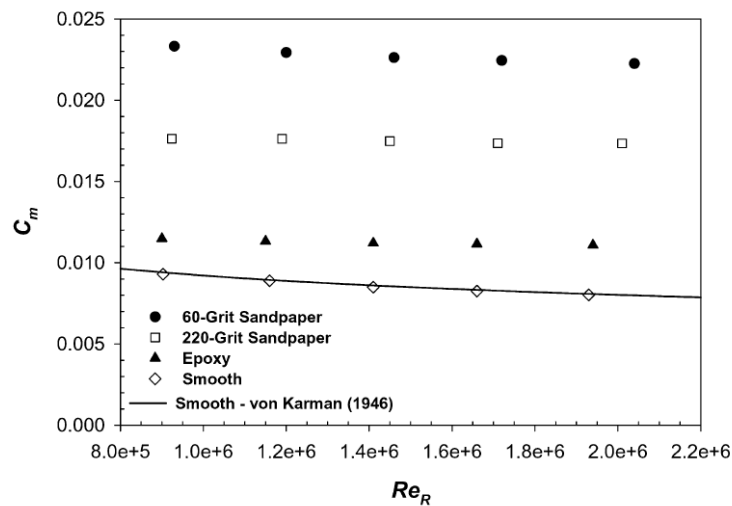
Deze viscosimeter bestaat uit twee cilinders die rond eenzelfde as draaien. De meetmethodologie is vergelijkbaar met dat van de *single cylinder type* viscosimeter, met het verschil dat de coaxiale viscosimeter de viscositeit onder een constante schuifspanning meet (Rahman et al., 2014). In het huidig onderzoek bevindt het fluïdum zich niet volledig in de grenslaag omdat de afstand tussen de wand van de maatbeker en de spindel te groot is. Hier zal de grenslaag enkel gevormd worden rondom de spindel.

Indien men viscositeitsmetingen wil uitvoeren met de blanke spindel, is het belangrijk om op te merken dat er een laminaire stroming gewenst is tussen de maatbeker en de cilinderwand om de juiste metingen te behalen. Een laminaire stroming zal minder wrijving ondervinden met het cilinderoppervlak dan een turbulente stroming. Wanneer de oppervlakteruwheid toeneemt, wordt deze laminaire stroming verstoord en ontstaat er een turbulente stroming. Bij een turbulente stroming worden hogere viscositeitswaarden gemeten (Howell & Behrends, 2006). Wanneer de snelheid kleiner is of de viscositeit lager is, zal het effect van oppervlakteruwheid kleiner zijn. Wanneer de snelheid verhoogt zullen de spindels zich meer gaan onderscheiden van elkaar.

1.3.1 De coëfficiënt van de torsie

De grensviscositeit stijgt naarmate de ruwheidselementen meer uitgesproken zijn. De grensviscositeit is de viscositeit in de grenslaag, nabij de spindel. Hoewel de viscositeit buiten de grenslaag constant blijft, zal het in de grenslaag toenemen omwille van een grotere impulsoverdracht tussen de moleculen. Dit is te wijten aan de onregelmatigheden van de wand waardoor de stroming anistroop wordt en er meer momentum wordt overgedragen tussen de moleculen. Dit resulteert in een verhoging van de schuifspanning. In de rotatieviscosimeter wordt dit ervaren door een toename van de torsie en bijgevolg van de gemeten viscositeit (Papanikolaou et al., 2017).

Figuur 15 toont de coëfficiënt van de torsie C_m op de y -as en het Reynoldsgetal, in functie van de diameter van de spindel op de x -as. In dit onderzoek van Schultz en Myers werden er vier oppervlakteruwheden vergeleken: een glad oppervlak (*Smooth*), een epoxy coating (*Epoxy*) en schuurpapier met een korrel 220 en 60 (*220-Grit Sandpaper* en *60-Grit Sandpaper*).



Figuur 15 Torsie in functie van verschillende oppervlakteruwheden
Bron: Schultz & Myers, 2003

De resultaten van het onderzoek zijn weergegeven in **Figuur 15**. De epoxy coating ondervindt een stijging van 22% à 37% voor de torsie in vergelijking met het glad oppervlak. Voor het schuurpapier met korrelgrootte 220 is dit 88% à 116% en voor het schuurpapier met korrelgrootte 60 is dit 150% à 179%.

De volle lijn op **Figuur 15** is de coëfficiënt van de torsie voor een glad oppervlak berekend met de formule van von Kármán beschreven in vergelijking (11).

$$C_m = \frac{0,146}{Re_R^{1/5}} \quad (11)$$

Waarbij:

C_m Coëfficiënt van de torsie

Re_R Reynoldsgetal in functie van de diameter van de spindel

In het onderzoek van Schultz en Myers werd C_m omgezet naar de ruwheidsfunctie ΔU^+ in functie van de ruwheidshoogte k . Er werd een gemiddelde waarde berekend voor de ruwheidshoogte voor elk oppervlak. Prof. Schultz gebruikt de ruwheidsfunctie om de invloed van de oppervlakteruwheid op de weerstand te berekenen (Schultz & Myers, 2003).

Het onderzoek van Papanikolaou, Frank en Drikakis heeft aangetoond dat, in de aanwezigheid van oppervlakteruwheid, de grensviscositeit zal stijgen met de bevochtigbaarheid van de wand. De bevochtigbaarheid van de wand is het vermogen dat een vloeistofmolecule heeft om contact te houden met de wand. Deze term zegt meer over de mate van hydrofobiciteit van een oppervlak (Hu et al., 2022). De intermoleculaire krachten tussen het vaste oppervlak van de spindel en de vloeistof beïnvloeden de viscositeit. Deze relatie wordt belangrijker naarmate de ruwheid meer uitgesproken is. Bij een glad oppervlak, heeft de bevochtigbaarheid van de wand geen invloed op de viscositeit. De conclusie van dit onderzoek is dat de viscositeit in het algemeen beïnvloedt wordt door de dikte van de grenslaag, de ruwheid van de spindel en de bevochtigbaarheid van de spindel (Papanikolaou et al., 2017).

2 Materiaal en methode

2.1 Meetsysteem

Zoals reeds werd vermeld, werden alle metingen uitgevoerd met de Haake Viscotester D Type R en de R1 spindel. **Tabel 1** toont een samenvatting van de productspecificaties van het toestel. Het toestel werd steeds op een stabiele ondergrond geplaatst, vrij van vibraties die afkomstig zouden zijn van andere toestellen. Het is belangrijk dat het toestel waterpas staat om juiste metingen te bekomen (*HAAKE Viscotester D - Instruction Manual, 2018*).

Tabel 1 Specificaties Haake Viscotester D Type R
Bron: HAAKE Viscotester D - Instruction Manual, 2018

| | |
|-----------------------------|--|
| Ingangsspanning | 100 - 240 V |
| Ingangsfrequentie | 50 - 60 Hz |
| Snelheden | 0,1 tot 200 RPM |
| Gebruiksomgeving | Omgevingstemperatuur +10°C tot 40°C en relatieve luchtvochtigheid < 80% |
| Temperatuurbereik | -10°C tot 100°C |
| Maximale draaimoment | 718,7 μNm |
| Nauwkeurigheid | $\pm 1\%$ van de basisschaal |
| Reproduceerbaarheid | $\pm 0,2\%$ van de basisschaal |
| Viscositeitsbereik | 100 – 13 000 000 mPa.s |

Om de juistheid van elke meting te garanderen, werd de meetmethode geconformeerd aan de Europese Standaard ISO 2555. Deze meetnorm beschrijft een universele werkwijze voor het uitvoeren van de viscositeitsmetingen, alsook het mechanisme van een *single cylinder type* rotatieviscometer zoals de Haake Viscotester D. Dit is een rotatieviscosimeter waar één enkele cilinder roteert in een fluïdum met een constante rotatiesnelheid om de viscositeit te bepalen. De viscositeit wordt gemeten in een fluïdum met een variabele schuifspanning, waardoor de viscositeit afhankelijk is van de meetomstandigheden. Wanneer meetresultaten aan de norm voldoen, kunnen ze vergeleken worden met diverse onderzoeken die dezelfde norm hanteren (*ISO 2555, 2018*).

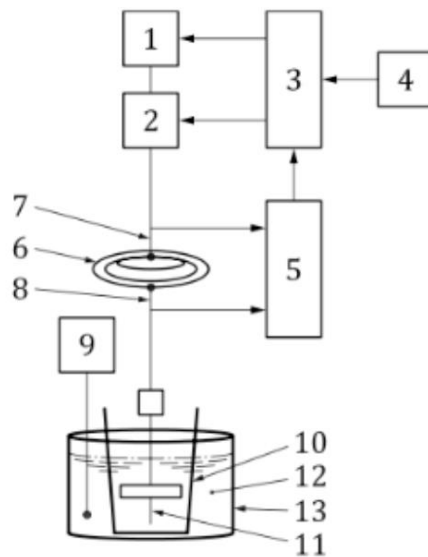
2.1.1 Onderdelen

De viscositeitsmeter bestaat uit een hoofdeenheid en een voet. De hoofdeenheid en de voet worden met elkaar verbonden door een staaf. Aan deze staaf zijn twee moeren gemonteerd, die ervoor zorgen dat de hoofdeenheid verticaal en horizontaal verstelbaar is. Het toestel werd opgestart door het aan te sluiten op een voedingsbron en de elektrische schakelaar in te duwen. Onderaan de voet zijn drie regelbare schroeven gemonteerd, die dienstdoen om het toestel waterpas te zetten. Dit wordt gecontroleerd door de waterpas op **Figuur 16**, gemonteerd achter de hoofdeenheid.



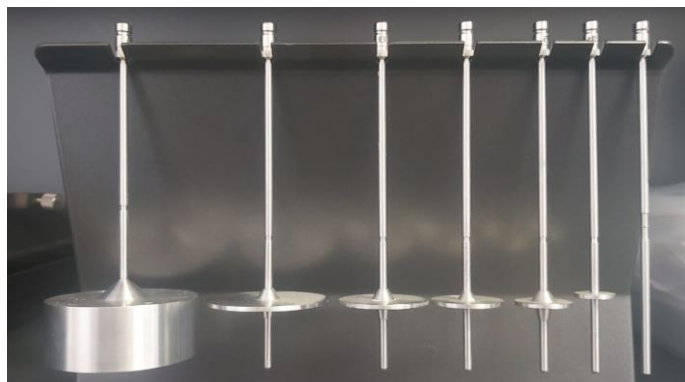
Figuur 16 HAAKE viscotester D waterpas
Bron: Eigen werk

Figuur 17 stelt alle onderdelen voor die in de viscosimeter aanwezig zijn. In de hoofdeenheid zijn de motor (2) en de processor (3) gevestigd. De motor is verbonden met een eerste verticale as (7), die vervolgens in verbinding staat via een veer (6) met de onderste schroefas (8). Tussen deze twee assen wordt de hoekafwijking tussen de spindel en de motor gemeten (5). Het uiteinde van deze tweede verticale as is het aanhechtingspunt voor de spindel (11). De metingen worden weergegeven op een digitaal display (1) om het aflezen te vergemakkelijken en de kans op afleesfouten te verkleinen (Gupta, 2014). In de maatbeker (13) bevindt zich het fluïdum (12), de spindel met zijn bescherming (10) en een thermometer (9) (ISO 2555, 2018).



Figuur 17 Werking van de viscometer
Bron: ISO 2555, 2018

De spindels bestaan in verschillende vormen en maten en zijn voorgesteld op **Figuur 18**. Dit zijn de meetinstrumenten van de rotatieviscosimeter en zijn uit metaal vervaardigd. De spindels werden gecontroleerd op schade voor elk gebruik. Indien de spindels beschadigd zijn, kan dit valse metingen opleveren. Er zijn zeven verschillende spindels meegeleverd: R1, R2, R3, R4, R5, R6 en R7 (**Figuur 18** van links naar rechts). De spindels hebben de geometrie van een cilinder of een schijf en bezitten elk een verschillende oppervlakte. Een spindel met een groter oppervlak wordt gebruikt voor vloeistoffen met een lagere viscositeit. Omgekeerd wordt een spindel met een klein oppervlak gebruikt voor zeer viskeuze vloeistoffen.



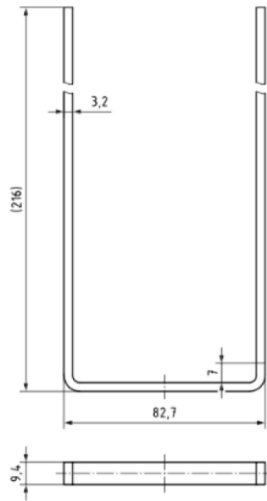
Figuur 18 Spindels
Bron: Eigen werk

Bij elk type viscosimeter horen specifieke spindels die gekoppeld kunnen worden aan het toestel. Wanneer een foutieve spindel wordt gebruikt of geselecteerd op het display, toont het toestel een onjuiste meting (*HAAKE Viscotester D - Instruction Manual, 2018*). In dit onderzoek is het cruciaal om bij elke meting hetzelfde type spindel te gebruiken, zodat de viscositeitsmetingen eenvoudig te vergelijken zijn. Merk op dat viscositeitsmetingen kunnen verschillen tussen twee spindels met een verschillende geometrie (*ISO 2555, 2018*).

De onderkant van de spindel moet minstens 10 mm verwijderd zijn van de bodem van de maatbeker. Indien de spindel te dicht bij de bodem van de maatbeker roteert, kan er een drukverlies optreden in het fluïdum. Door een te kleine afstand tussen bodem en spindel, ontstaat een draaiende stroombeweging vergelijkbaar met een draaikolk. De vloeistof verplaatst zich naar de wanden van de maatbeker, waardoor er onder de spindel een gebied ontstaat met een lagere druk. Door het verlies in druk wordt de spindel naar de bodem van de maatbeker gezogen, wat resulteert in een neerwaartse kracht op de spindel. Dit effect leidt tot foutieve metingen (Dennington et al., 2021). Volgens de norm zijn de afmetingen van de maatbeker, buiten deze voorwaarde, irrelevant. Enkel wanneer verscheidene metingen worden vergeleken, moeten deze metingen in dezelfde maatbeker gebeuren (*ISO 2555, 2018*).

De handleiding raadt echter een maatbeker aan met een diameter tussen 90 mm en 92 mm, en een hoogte tussen 115 mm en 160 mm. Indien de gebruikte maatbeker kleiner is, levert dit wederom foutieve metingen op. Dit is hoofdzakelijk een probleem bij fluïda met een lage viscositeit. Met als gevolg dat de gemeten viscositeitswaarden groter kunnen uitkomen dan de reële viscositeitswaarden (*HAAKE Viscotester D - Instruction Manual, 2018*). In dit onderzoek, draait de spindel rond in een maatbeker van 1L. De maatbeker heeft een hoogte van 140,0 mm en een diameter van 115,0 mm. De diameter van deze maatbeker is groter dan wat wordt aangeraden in de *Haake viscotester D* handleiding en zal dus geen foutieve metingen veroorzaken.

Figuur 19 toont de stijgbeugel die rond de spindel wordt geplaatst ter bescherming van de spindel en zijn rotatie-as. Deze bescherming heeft een hoogte van 216 mm en een breedte van 82,7 mm.



Figuur 19 Afmetingen stijgbeugel
Bron: ISO 2555, 2018

De staaf waaruit deze stijgbeugel is gevormd, heeft een dikte van 3,2 mm en is 9,4 mm breed (ISO 2555, 2018). Deze bescherming dient altijd te worden gebruikt, voornamelijk in fluïda met een lage viscositeit. De aan- of afwezigheid van deze bescherming moet telkens worden vermeld in het testrapport (HAAKE Viscotester D - Instruction Manual, 2018). De bescherming werd effectief bij elke meting gebruikt. Er werd niet onderzocht naar de invloed van de bescherming op de grenslaag.

Het uiteindelijke resultaat van de opstelling is te zien in **Figuur 20**. (HAAKE Viscotester D - Instruction Manual, 2018).



Figuur 20 Opstelling viscositeitsmeting
Bron: Eigen werk

Voordat de metingen werden gestart, werd gecontroleerd dat de spindel goed bevestigd was aan de rotatie-as. Er werd ook altijd nagegaan of de juiste spindel en snelheid werden geselecteerd op het meetconfiguratiescherm.

2.1.2 Meetbereik

Door te variëren met de rotatiesnelheid en de cilinderomvang, kan het meetbereik van de viscosimeter worden vergroot. Om het meetbereik nog groter te maken, bestaan er twee modellen van deze viscosimeter: het *Type R* en het *Type L*. Het type L wordt gebruikt voor substanties met een relatief lage viscositeit. Dit type heeft een meetbereik van 15 tot 2 000 000 *mPa.s*. Hierbij kunnen combinaties gekozen worden tussen vier cilindervormen en éénentwintig rotatiesnelheden. Het type R heeft een groter viscositeitsbereik en is geschikt voor een viscositeit van 100 tot 13 000 000 *mPa.s*. Dit wordt behaald door zes verschillende cilindervormen en éénentwintig snelheden te combineren. In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van het type R, de standaardvorm. **Tabel 2** toont de maximale waarden per spindel en rotatiesnelheid. Het maximale meetbereik wordt behaald door de kleinste spindel (R7) te laten draaien op de laagste rotatiesnelheid (0,1 RPM). Idem dito, wordt het minimale meetbereik bekomen door de grootste spindel (R1) aan de hoogste rotatiesnelheid te laten draaien (200 RPM). In dit onderzoek werd de rotatiesnelheid van de spindel op voorhand beslist in functie van de verwachte viscositeit.

Over het algemeen is het zo dat wanneer de grootte van de spindel afneemt, de leesprecisie toeneemt. Dit komt doordat kleinere spindels minder massa hebben en daarom minder gevoelig zijn voor externe krachten en trillingen, waardoor de metingen nauwkeuriger worden. Merk op dat dit niet altijd het geval is en dat er nog andere factoren zijn die de leesprecisie kunnen beïnvloeden bij het gebruik van een rotatieviscosimeter (HAAKE Viscotester D - Instruction Manual, 2018).

Tabel 2 Maximum aangewezen viscositeit Haake Viscotester D type R
Bron: *HAAKE Viscotester D - Instruction Manual, 2018*

| Spindel-NR. | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 |
|------------------|---------------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|----------------------|----------------------|
| RPM | Viscositeit <i>mPa. s</i> | | | | | | |
| 0,1 | 100K | 400K | 1000K | 2000K | 3,9M | 10M | 40M |
| 0,2 | 50K | 200K | 500K | 1000K | 2M | 5M | 20M |
| 0,3 | 33,3K | 133,3K | 333,3K | 666,6K | 1,3M | 3,33M | 13,3M |
| 0,5 | 20K | 80K | 200K | 400K | 800K | 2M | 8M |
| 0,6 | 16,6K | 66,6K | 166,6K | 333,3K | 666,6K | 1,6M | 6,6M |
| 1 | 10K | 40K | 100K | 200K | 400K | 1M | 4M |
| 1,5 | 6,6K | 26,6K | 66,6K | 133,3K | 66,6K | 666,6K | 2,6M |
| 2 | 5K | 20K | 50K | 100K | 200K | 500K | 2M |
| 2,5 | 4K | 16K | 40K | 80K | 160K | 400K | 1,6M |
| 3 | 3,3K | 13,3K | 33,3K | 66,6K | 133,3K | 333,3K | 1,3M |
| 4 | 2,5K | 10K | 25K | 50K | 100K | 250K | 1M |
| 5 | 2K | 8K | 20K | 40K | 80K | 200K | 800K |
| 6 | 1,6K | 6,6K | 16,6K | 33,3K | 66,6K | 166,6K | 666,6K |
| 10 | 1K | 4K | 10K | 20K | 40K | 100K | 400K |
| 12 | 833 | 3,3K | 8,3K | 16,6K | 33,3K | 83,3K | 333,3K |
| 20 | 500 | 2K | 5K | 10K | 20K | 50K | 200K |
| 30 | 333 | 1,3K | 3,3K | 6,6K | 13,3K | 33,3K | 133,3K |
| 50 | 200 | 800 | 2K | 4K | 8K | 20K | 80K |
| 60 | 160 | 660 | 1,6K | 3,3K | 6,6K | 16,6K | 66,6K |
| 100 | 100 | 400 | 1K | 2K | 4K | 10K | 40K |
| 200 | 50 | 200 | 500 | 1000 | 2K | 5K | 20K |
| Increment | 1 <i>mPa. s</i> | 1 <i>mPa. s</i> | 10 <i>mPa. s</i> | 10 <i>mPa. s</i> | 10 <i>mPa. s</i> | 100 <i>mPa. s</i> | 100 <i>mPa. s</i> |

2.1.3 Parameters

De viscositeit is een maat voor de stroperigheid van een vloeistof en is een belangrijk materiaaleigenschap (Viswanath et al., 2007). De viscositeit van een vloeistof varieert naargelang de temperatuur, druk, afschuifsnelheid en concentratie (Eng Giap Goh, 2010). Doorgaans daalt de viscositeit van een vloeistof bij een stijgende temperatuur en stijgt de viscositeit bij een toenemende druk. De concentratie of dichtheid zal de kinematische viscositeit beïnvloeden. Dit werd eerder aangetoond in vergelijking (4) (Chhabra, 2010).

Hierboven werd reeds vermeld dat deze specifieke rotatieviscosimeter de viscositeit meet bij een variabele schuifspanning. Dit impliceert dat de viscositeitsmetingen afhankelijk zijn van een aantal omgevingsfactoren. Een deel van deze factoren zijn inherent aan de meetmethode, zoals de meetsnelheid, de spindelgeometrie, de manier waarop de vloeistof in de maatbeker wordt gebracht, etc. Het andere deel bestaat uit omgevingsfactoren die altijd invloed uitoefenen op de viscositeit, zoals de temperatuur en de druk (Brush, 1962). Voorafgaand aan elke meting worden zes parameters in acht genomen. In het belang van dit onderzoek werd de druk als constant beschouwd en gelijkgesteld aan de atmosferische druk. Het is van essentieel belang om elke parameter constant te houden gedurende de volledige meting. Dit geldt tevens als fundamentele vereiste voor de vergelijkbaarheid van verschillende metingen (ISO 2555, 2018).

2.1.3.1 Het fluïdum

Het doel van dit onderzoek was om drie verschillende fluïda te analyseren, namelijk zoetwater, zoutwater en glycerine. De viscositeit en dichtheid van deze monsters was bij voorbaat gekend bij drie verschillende temperaturen, met name 0°C, 20°C en 40°C.

In **Tabel 3** wordt de viscositeit van zoetwater voorgesteld bij deze drie temperaturen. **Tabel 4** en **Tabel 5** tonen de viscositeitswaarden voor zeewater en glycerine (Hendriks, 2020). Om de nauwkeurigheid van de metingen te garanderen, is het van groot belang dat de monsters homogeen zijn en volledig vrij van onzuiverheden die de metingen kunnen verstoren. (ISO 2555, 2018). De maatbeker werd telkens zorgvuldig gevuld met het fluïdum zodat de kans op luchtballen nihil was.

Tabel 3 Viscositeit van zoetwater bij 3 temperaturen
Bron: Hendriks, 2020

| T [°C] | Densiteit [Kg/m ³] | Kinematische viscositeit v [$\frac{m^2}{s} \cdot 10^{-6}$] | Dynamische viscositeit η [(Pa. s). 10 ⁻³] |
|--------|--------------------------------|---|---|
| 0 | 999,8498 | 1,7858 | 1,7860 |
| 20 | 998,2072 | 1,0034 | 1,0020 |
| 40 | 992,2164 | 0,6579 | 0,6530 |

Tabel 4 Viscositeit van zeewater bij 3 temperaturen
Bron: Hendriks, 2020

| T [°C] | Densiteit [Kg/m ³] | Kinematische viscositeit v [$\frac{m^2}{s} \cdot 10^{-6}$] | Dynamische viscositeit η [(Pa. s). 10 ⁻³] |
|--------|--------------------------------|---|---|
| 0 | 1028,1499 | 1,8480 | 1,9000 |
| 20 | 1024,8103 | 1,0508 | 1,0770 |
| 40 | 1018,0142 | 0,6950 | 0,7080 |

Tabel 5 Viscositeit van glycerine bij 3 temperaturen
Bron: Hendriks, 2020

| T [°C] | Densiteit [Kg/m ³] | Kinematische viscositeit v [$\frac{m^2}{s} \cdot 10^{-6}$] | Dynamische viscositeit η [(Pa. s). 10 ⁻³] |
|--------|--------------------------------|---|---|
| 0 | 1261,1000 | 12070,0000 | 2258,7390 |
| 20 | 1261,1000 | 1410,0000 | 1118,0720 |
| 40 | 1261,1000 | 284,0000 | 225,2000 |

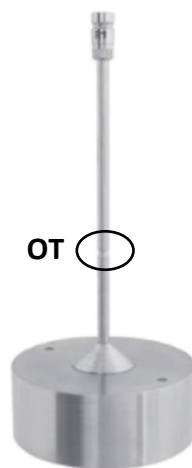
In de huidige studie werd kraanwater gebruikt ter substitutie van zoetwater. De metingen werden uitgevoerd in kraanwater met een theoretische dichtheid van 1000 kg/m³. Voor de metingen in zoutwater werden verschillende natriumchloride-oplossingen voorbereid. De natriumchloride-oplossingen werden gemaakt in vier verschillende dichtheden, met een zoutgehalte van 1 wt%, 2 wt%, 3 wt% en 3,5 wt%.

Bij 3,5 wt% zout heeft de natriumchloride-oplossing dezelfde kinematische viscositeit en osmotische druk als zeewater (Dennington et al., 2021). Voor de metingen in glycerine werden 5 waterige glycerineoplossingen gemaakt met vijf verschillende concentraties. De oplossingen beginnen met een kleine glycerineconcentratie van 24,0 wt% vermengd in water. De glycerineconcentratie in het water wordt stapsgewijs opgedreven tot 99,5 wt%.

Glycerine werd gebruikt om de viscositeit van het fluïdum te verhogen, zodat de waarden binnen het meetbereik van de rotatieviscosimeter zouden vallen. In dit onderzoek werd gekozen voor glycerine door de veelvuldige beschikbare informatie in wetenschappelijke artikels en de compatibiliteit van het medium met het toestel. Er werden reeds veel onderzoeken uitgevoerd naar de viscositeit van waterige glyceroloplossingen op verschillende temperaturen en dichtheden (Chaitanya Lahari et al., 2019), (Michal et al., 2017), (Takamura et al., 2012), (Ferreira et al., 2017). Deze testfluïda worden uitgebreider besproken in hoofdstuk 4.1.

2.1.3.2 R1 spindel

Zoals eerder aangegeven, werd in dit onderzoek uitsluitend gebruik gemaakt van de R1 spindel, voorgesteld in **Figuur 21**.



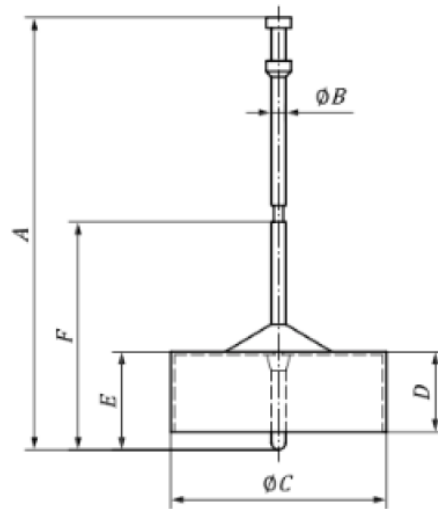
Figuur 21 R1 spindel
Bron: ISO 2555, 2018

De keuze voor het gebruik van de R1 spindel werd gerechtvaardigd door het feit dat de grotere oppervlakte eenvoudig te manipuleren was. Bovendien biedt deze spindel extra voordelen doordat hij eenvoudig op en van de as te schroeven is. Het is aangeraden om de R1 spindel in fluïda met lage viscositeit te gebruiken, wat de spindel geschikt maakt voor het meten van de bovenvermelde fluïda (*ISO 2555, 2018*).

Elke spindel is getekend met een markering op zijn as voorgesteld door OT op **Figuur 21**. Dit duidt het onderdompelingsniveau aan. De spindels werden in het fluïdum gebracht tot op hetzelfde niveau als dit onderdompelingsteken. Indien dit niet het geval is, kan het toestel verkeerde metingen weergeven.

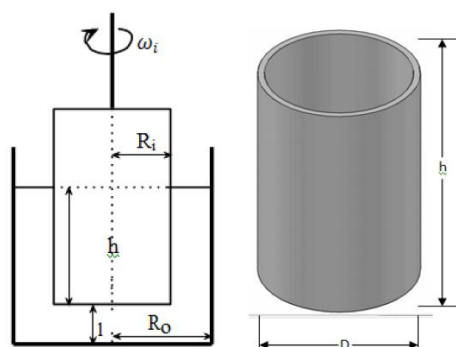
De spindel werd eerst ondergedompeld in het fluïdum onder een hoek van 45° alvorens op de as te worden geschroefd. Dit helpt om luchtbellens rond het oppervlak en in de vloeistof te minimaliseren. In de R1 spindel bevinden zich gaten op het bovenste oppervlak van de cilinder waardoor luchtbellens, die toch zijn ontstaan, kunnen ontsnappen. Bij *S2* en *S3* zijn deze gaten deels verstopt door de verf en het straalgrit die werden aangebracht op het oppervlak. Het is belangrijk om bij deze spindels extra aandacht te besteden aan eventuele luchtbellens. Vervolgens wordt de cilinder verticaal op de as geschroefd (*HAAKE Viscotester D - Instruction Manual, 2018*).

In **Figuur 22** wordt de R1 spindel getoond met een totale lengte A van $133,4 \text{ mm}$. De afstand tussen het onderste punt van de as en het onderdompelingsteken F is gelijk aan $61,1 \text{ mm}$. De as heeft een diameter B van $3,18 \text{ mm}$ en de diameter van de cilinder C bedraagt $56,3 \text{ mm}$. De hoogte van de cilinder D is gelijk aan $22,5 \text{ mm}$. De afstand tussen het bovenste oppervlak van de cilinder en het onderste punt van de as E is $27,0 \text{ mm}$. De spindel werd in het centrum van de maatbeker gepositioneerd op een afstand van $41,85 \text{ mm}$ van de wand van de beker. De afstand tussen de bodem van de maatbeker en de spindel was $68,10 \text{ mm}$, wat groter is dan 10 mm (*ISO 2555, 2018*).



Figuur 22 Afmetingen spindel R1
Bron: ISO 2555, 2018

In hoofdstuk 1 werd reeds vermeld dat de coaxiale cilinder viscosimeter vaak wordt gebruikt in wetenschappelijk onderzoek naar de weerstand en oppervlakteruwheid van coatings. Bij deze viscosimeters is er sprake van een grote onzekerheid omtrent de uiteinden van het meetinstrument. De uiteinden van de spindel veroorzaken een bijkomende weerstand aan de boven- en onderzijde van de spindel, beschreven als eindeffecten. Er is geen verdere informatie gevonden over de toepasbaarheid van de eindeffecten op de *single cylinder type* viscosimeter. Omwille van deze reden is dit aspect niet meegenomen in het verdere onderzoek. De coaxiale cilinder viscosimeter wordt voorgesteld op **Figuur 23**, waarop links het meetsysteem te zien is en rechts het meetinstrument. Het meetinstrument van een coaxiale cilinder viscosimeter is veel groter dan de spindels die worden gebruikt in de opstelling met de HAAKE viscotester D (Rahman et al., 2014).



Figuur 23 Coaxiale cilinder viscosimeter met zijn meetinstrument
Bron: Rahman et al., 2014

2.1.3.3 Snelheid

De hoeksnelheid wordt uitgedrukt in revoluties per minuut, afgekort als RPM. Dit geeft de rotatiesnelheid aan van de spindel. Er is keuze uit éérentwintig voorgeprogrammeerde snelheden, variërend van 0,1 tot 200 RPM (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.6, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 20, 30, 50, 60, 100 of 200 RPM). De keuze van de snelheid is afhankelijk van de spindel en de viscositeit van het medium dat wordt onderzocht. Merk op dat de spindel enkel werkt aan de voorgeprogrammeerde snelheden. Indien een andere snelheid wordt ingevoerd, zal het scherm de dichtstbijzijnde voorgeprogrammeerde snelheid nemen.

Het apparaat vergt enkele revoluties om een stabiele toestand te bereiken. De tijd die het toestel hiervoor nodig heeft, varieert in functie van de ingestelde rotatiesnelheid. Wanneer de rotatiesnelheid op het scherm niet langer blinkt, is de snelheid van de motor gestabiliseerd. Het is belangrijk om op te merken dat de spindel slechts in één richting kan roteren.

Het is noodzakelijk om in dit onderzoek, zoals bij alle reologische metingen, metingen uit te voeren in een laminaire stroming. Wanneer de rotatiesnelheid in verhouding tot de viscositeit te groot is, kan de laminaire stroming overslaan naar een turbulente stroming. In dit geval zal de rotatieviscosimeter superieure waarden geven door de turbulente stroming. Bij de R1 spindel en in een medium met een viscositeit van $100 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, vindt de overgang van laminair naar turbulent plaats bij een rotatiesnelheid van 50 RPM . Indien de verhouding tussen de snelheid en de viscositeit hoger is dan deze waarden, wordt het fluïdum turbulent. In dit geval, dient de gebruiker de rotatiesnelheid te verlagen (*HAAKE Viscotester D - Instruction Manual, 2018*).

In theorie dienen dezelfde instellingen op het menu te worden geselecteerd voor elke meting, om de metingen zo constant mogelijk uit te voeren. In de praktijk was dit niet altijd mogelijk doordat de viscositeit van het medium te laag was ten opzichte van het meetbereik van de HAAKE viscotester D. Bij de natriumchlorideoplossingen werd een constante rotatiesnelheid van 200 RPM aangehouden. Maar bij de metingen in de water-glycerineoplossingen varieerden de snelheden tussen 5 RPM en 200 RPM.

Dit was onvermijdelijk aangezien de rotatieviscosimeter weigerde om metingen uit te voeren aan de initiële snelheid door de grote verschillen in viscositeit. Omdat er enkel metingen werden uitgevoerd in Newtoniaanse fluïda, is de viscositeit onafhankelijk van de gebruikte snelheid tijdens de metingen.

2.1.3.4 Densiteit

De algemene eenheid van densiteit is kilogram per kubieke meter [kg/m^3]. Op het apparaat werd de densiteit ingevuld met een eenheid in gram per kubieke centimeter [g/cm^3].

De densiteit van een medium varieert naargelang de temperatuur, druk en concentratie. In dit onderzoek werd verondersteld dat de druk constant blijft gedurende alle metingen en gelijk is aan de atmosferische druk. In deze meetopstelling zijn de concentratie en de temperatuur variabelen waar men rekening mee moet houden wanneer de densiteit ingevuld wordt in het meetconfiguratiemenu. Doorgaans neemt de densiteit van een fluïdum af bij een stijging in temperatuur.

Densiteit en viscositeit zijn beide karaktereigenschappen van een fluïdum. Het verband tussen de dynamische viscositeit en de densiteit is de kinematische viscositeit (Vergelijking (4)). In het algemeen gaat een hogere densiteit gepaard met een hogere viscositeit, maar dit geldt niet voor alle fluïda. Er bestaan uitzonderingen zoals zware vloeistoffen, die een hoge densiteit en een lage viscositeit bezitten. Voorbeelden van zware vloeistoffen zijn kwik en broom (Ferreira et al., 2017). In deze studie is vastgesteld dat dit geldt voor de geteste vloeistoffen.

Wanneer de gebruiker een densiteit ingeeft dat afwijkt van de standaarddensiteit van $1 g/cm^3$, verandert de eenheid van viscositeit van de dynamische viscositeit naar de kinematische viscositeit. De kinematische viscositeit wordt uitgedrukt in centistokes [cSt] en staat gelijk aan één vierkante millimeter per seconde [mm^2/s]. De dynamische viscositeit wordt uitgedrukt in Pascalseconde [$Pa \cdot s$] of in Millipascalseconde [$mPa \cdot s$]. Gebruikers kunnen hun voorkeursinstellingen voor de eenheden selecteren in het configuratiemenu (HAAKE Viscotester D - Instruction Manual, 2018).

2.1.3.5 Temperatuur

De temperatuur werd telkens vastgesteld met behulp van een externe thermometer. De thermometer moet aan twee vereisten voldoen: het toestel moet temperatuurmetingen verrichten tot één decimaal na de komma en dient een precisie $0,2^{\circ}\text{C}$ te garanderen (*HAAKE Viscotester D - Instruction Manual, 2018*). Voor de temperatuurmetingen werd gebruik gemaakt van de Go! Temp[®] temperatuursensor van Vernier, welke verbonden werd via een USB-kabel aan een laptop. De verzamelde gegevens werden getoond op de Logger Lite[®] software, die werd geïnstalleerd op de laptop (*Go!Temp[®], 2014*). De rotatieviscosimeter beschikt eveneens over een ingebouwde USB-poort in de hoofdeenheid. Het is echter niet verder onderzocht of deze thermometer op de viscosimeter kan worden aangesloten.



Figuur 24 Go! Temp[®] Temperatuursensor
Bron: Go!Temp[®], 2014

Voorafgaand aan elke meting werd de temperatuur van het fluïdum afgenomen. Het is belangrijk om de temperatuur constant te houden in het fluïdum, want dit beïnvloedt de viscositeit die de spindel meet. Een temperatuursverandering van 1°C , kan zorgen voor verschil in viscositeit van 10%. Tijdens de meting is er een variatie toegelaten van maximaal $0,2^{\circ}\text{C}$. Indien de afwijking groter is dan $0,2^{\circ}\text{C}$ wordt de temperatuur niet langer als constant beschouwd. Dit is te wijten aan de omgevingsfactoren die de meting beïnvloeden en valse viscositeitswaarden kunnen geven. Bovendien zijn de metingen dan niet meer identiek waardoor ze niet met elkaar kunnen worden vergeleken (*ISO 2555, 2018*).

De temperatuur van het monster moet stabiel zijn vooraleer een meting kan worden uitgevoerd. Dit werd verzekerd door het fluïdum genoeg tijd te geven om te acclimatiseren aan de omgeving. Merk op dat de temperatuur van het fluïdum mede wordt beïnvloed door de temperatuur van de spindel en zijn bescherming. De temperatuur werd op meerdere plaatsen in de vloeistof afgelezen om de uniformiteit te garanderen. Indien de temperaturen in het fluïdum zouden verschillen, kan het helpen om even te roeren voor de homogenisering van het fluïdum (Kurkin et al., 2020). Men moet vermijden dat het fluïdum in direct zonlicht of in een luchtstroom wordt geplaatst, waardoor het fluïdum zou kunnen opwarmen of afkoelen tijdens de metingen (Dennington et al., 2021). De eerste metingen werden uitgevoerd bij een omgevingstemperatuur van 20°C. Om deze temperatuur te bereiken rustte het fluïdum in de maatbeker op kamertemperatuur tot de temperatuur van de vloeistof was gestabiliseerd.

Temperaturen die afwijken van de kamertemperatuur, zoals 0°C en 40°C, kunnen worden bereikt door middel van een thermostatisch bad. Dit thermostatisch bad wordt dan gevuld met water. De temperatuur van 0°C kan bereikt worden doormiddel van een ijsbad. Dit ijsbad is een mengsel van water en ijs, waardoor een constante temperatuur van 0°C wordt behouden (Merlone et al., 2007). De temperatuur van 40°C kan behaald worden door het water in het thermostatisch bad te verwarmen op een kookplaat. Water is een uitstekende warmteoverdracht-vloeistof en zal de vloeistof in de maatbeker opwarmen of afkoelen. Eens de gewenste temperatuur is bereikt, zal water er ook voor zorgen dat de temperatuur van de vloeistof stabiel wordt gehouden (Hendriks, 2020).

De intentie was om deze metingen bij drie temperaturen, met name 0°C, 20°C en 40°C uit te voeren. Dit zou het mogelijk maken om de invloed van temperatuur op de viscositeit te onderzoeken. Helaas werd dit niet gedaan omwille van een defect in het toestel, waardoor verdere metingen onuitvoerbaar waren.

2.1.3.6 Percentage van de basisschaal

Zoals reeds vermeld zit er een veer tussen de motor en de spindel, die het mogelijk maakt om de hoekafwijking te meten. Wanneer de spindel begint te draaien, ontstaat er een stroming in het fluïdum. Het resultaat is dat de werkelijke hoeksnelheid van de spindel ten opzichte van het fluïdum kleiner wordt dan de hoeksnelheid tussen de motor en het fluïdum. Dit verschil in hoeksnelheid tussen de motor en de spindel leidt tot torsie (Schultz & Myers, 2003). Het percentage van de basisschaal is een maatstaf voor de torsie die wordt uitgeoefend op de spindel. 100% van deze schaal staat gelijk aan het maximale draaimoment dat de viscosimeter kan genereren.

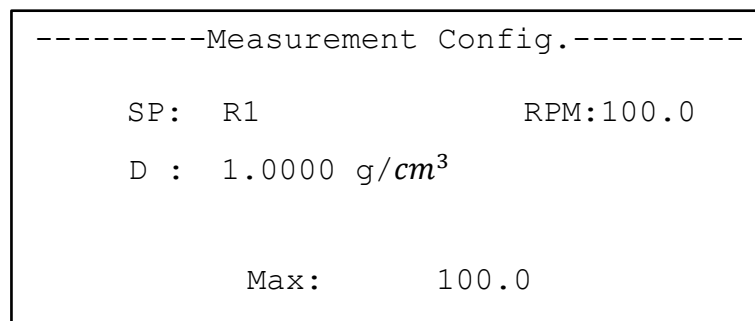
In de handleiding van de HAAKE viscotester D worden viscositeitsmetingen onder 15% of boven 95% van de volledige basisschaal niet erkend. Deze viscositeitsmetingen worden als foutief beschouwd en het toestel luidt een alarm bij elke rotatie in deze omstandigheden. Volgens de norm ISO 2555 liggen de resultaten met voorkeur tussen 45% en 95% van de volledige basisschaal. Het uiteindelijke meetbereik is bijgevolg kleiner dan aangegeven in de handleiding. Indien metingen niet in dit bereik komen te liggen, moet de gebruiker de rotatiesnelheid of de spindel aanpassen. Een uitzondering ontstaat wanneer meerdere viscositeitsmetingen met elkaar worden vergeleken. In dit geval is het voordeliger om éénzelfde spindel te houden, ondanks dat de resultaten buiten het aangeraden meetbereik vallen (*ISO 2555, 2018*).

Merk op dat dit percentage belangrijk is in functie van de nauwkeurigheid van het toestel. De HAAKE Viscotester D heeft een nauwkeurigheid van $\pm 1\%$ van deze schaal. Indien deze basisschaal een waarde van 10% heeft, kan de mogelijke viscositeitsfout gelijk zijn aan 0,1%. Hetzelfde geldt voor de herhalingsnauwkeurigheid van $\pm 0,2\%$. Wanneer er dus metingen worden uitgevoerd met minder dan 15% van deze schaal, ontstaat er een relatief grotere foutmarge in verhouding tot de waarde die door het toestel wordt afgelezen (*HAAKE Viscotester D - Instruction Manual, 2018*).

2.2 Meetmethode

Wanneer het toestel wordt aangezet, voert het eerst een autotest uit ter controle van motorstoringen. Deze test dient uitgevoerd te worden zonder spindel. Wanneer de autotest succesvol is volbracht, verspringt het scherm naar het hoofdmenu. De autotest is succesvol volbracht wanneer er geen torsie gemeten wordt, aangezien er geen spindel op het toestel is gemonteerd. Indien de autotest niet succesvol is, wijst dit op een foute meting van de torsie waardoor foutieve metingen kunnen ontstaan (Dennington et al., 2021).

Het apparaat werd geconfigureerd naar het Engels en werd afgestemd op het meten van de temperatuur in graden Celsius [$^{\circ}C$], de dynamische viscositeit in Pascal-seconde [$Pa \cdot s$] en de kinematische viscositeit in Centistokes [cSt]. De gebruiker heeft de mogelijkheid om deze instellingen aan te passen in het configuratiemenu naar zijn of haar persoonlijke voorkeur. In **Figuur 25** wordt het meet-configuratiemenu weergegeven, waarbij de gebruiker de juiste spindel en de meetsnelheid heeft geselecteerd. Op basis van deze twee waarden berekent het toestel de maximale viscositeit in $mPa \cdot s$ dat het kan meten in deze omstandigheden (**Tabel 2**). Als laatst werd de dichtheid van het fluidum ingevuld in dit menu, uiteraard rekening houdend met de juiste temperatuur en concentratie.



Figuur 25 Schematische voorstelling van het meet-configuratiemenu
Bron: Eigen werk

De selectie van de snelheid en spindel kan worden bepaald door middel van de *trial and error* methode. In dat geval worden meerdere snelheden getest voor één spindel tot een draaimoment tussen 15% en 95% wordt bereikt, waarbij een ideale waarde hoger ligt dan 45%. Er kan ook gevarieerd worden met verschillende spindels bij éénzelfde snelheid om deze waarde te bereiken.

In dit onderzoek was de viscositeitswaarde van tevoren gekend, waardoor een andere methode werd toegepast om de juiste snelheid te vinden voor de R1 spindel. In **Tabel 2** werd gezocht naar de maximale viscositeit die net superieur was aan de gekende viscositeitswaarde. De bijhorende snelheid werd gebruikt om de metingen uit te voeren.

Het meetscherm, dat te zien is in **Figuur 26**, toont de instellingen die gekozen werden binnen het meet-configuratiemenu, zoals de geselecteerde spindel en de RPM. Indien alle parameters juist zijn ingesteld, kan de viscosimeter beginnen met het verzamelen van data. Het meetscherm geeft de gemeten viscositeit weer en het bijhorende percentage van de basisschaal. De temperatuur wordt enkel weergegeven indien het toestel geleverd wordt inclusief de temperatuursensor. Dit is hier niet het geval en bijgevolg zal er geen waarde verschijnen bij de temperatuur. Zoals reeds vermeld, wordt de temperatuur bepaald met behulp van de Go! Temp® temperatuursensor voorafgaand aan elke meting. Deze waarde werd consequent voor elke meting genoteerd, maar kon niet worden ingegeven in de rotatieviscosimeter.

```
-----Measurement Config.-----  
  
SP: R1                      RPM:100.0  
V : 17,35 mPa.s  
  
34,7%                      T : --. --°C  
Max :                      100.0
```

Figuur 26 Schematische voorstelling van het meetscherm
Bron: Eigen werk

Bij elke rotatie wordt een meting afgenomen die wordt geprojecteerd op het scherm. De viscositeitsmeting wordt telkens geactualiseerd op het display. De spindel moet minstens vijf rotaties hebben voltooid vooraleer de metingen in acht worden genomen. De oorzaak hiervan is dat het toestel eerst moet stabiliseren. Het apparaat beschikt tevens over de mogelijkheid om testprofielen op te slaan, waarmee het meten van viscositeit met dezelfde snelheid en spindel vergemakkelijkt wordt (*HAAKE Viscotester D - Instruction Manual, 2018*).

Het apparaat kan tot negen testprofielen opslaan in het geheugen. In het kader van dit onderzoek werd geen gebruik gemaakt van een testprofiel, aangezien de rotatiesnelheid te vaak werd aangepast om de metingen te optimaliseren.

Voorafgaand aan de viscositeitsmeting werd de tijd van de meting geprogrammeerd met de *Time to Stop* (TTS) functie. In de functie *Time to Stop* werd een tijdsspanne ingesteld. Het display vertoont de viscositeit die na dit tijdsverloop wordt gemeten. Een andere optie op het meetinstrument is de *Time to Torque* (TTT) functie. Bij de *Time to Torque* optie vult de gebruiker een bepaald percentage van de basisschaal in. De spindel stopt met de meting wanneer het gekozen percentage van het draaimoment is bereikt en geeft de viscositeit weer op het display. In het geval dat de veer tijdens de meting verder doordraait dan de gevraagde waarde, zal de motor onmiddellijk stoppen. Beide functies kunnen nooit gezamenlijk worden benut. De *Time to Stop* functie is pragmatisch voor dit experiment en werd geactiveerd in het testprofiel. De tijdsspanne werd geprogrammeerd op drie minuten (HAAKE Viscotester D - Instruction Manual, 2018).

De verzamelde data werden telkens uitgedrukt met betrekking tot drie factoren, met name het type viscometer (R of L), het spindelnummer en de rotatiesnelheid. In het testrapport, bijhorend bij de viscositeitsmetingen, werden de gegevens van **Tabel 6** vermeld (ISO 2555, 2018).

Tabel 6 Gegevens vermeld in het testrapport
Bron: ISO 2555, 2018

Gegevens te vermelden in het testrapport

| | |
|----------|---|
| A | Een referentie naar de norm ISO 2555;2018 |
| B | De benaming van de geteste vloeistof |
| C | De temperatuur tijdens de proef |
| D | Het model van de viscosimeter, spindelnummer, rotatiesnelheid |
| E | De waarde van de schijnbare viscositeit |
| F | De tijdsspanne van een meting |
| G | De afmetingen van de maatbeker |
| H | De aan- of afwezigheid van de beschermde stijgbeugel |

Tijdens het uitvoeren van de metingen werd er veel aandacht besteed aan de meetcondities. Bepaalde factoren kunnen de viscositeitswaarde of de nauwkeurigheid van de metingen beïnvloeden. Dit gaat over temperatuur, de combinatie spindel-snelheid, de maatbeker, de aan- of afwezigheid van de bescherming, de manier waarop het monster werd voorbereid, de tijd tussen opeenvolgende metingen, de omstandigheden van het monster voorafgaand aan de meting en de samenstelling van het monster (*HAAKE Viscotester D - Instruction Manual*, 2018).

Het voordeel van deze opstelling is dat het een simpele manier is om verschillende oppervlakten te bestuderen en te vergelijken. De opstelling is compact, eenvoudig uit te voeren en er is maar één gebruiker nodig om het toestel te bedienen. Daarnaast kan de gebruiker gemakkelijk variëren tussen verschillende fluïda, coatings en temperaturen. Het wordt eenvoudiger om de omgevingsparameters constant te houden, waardoor de foutmarge verkleint (Paepe, 2021).

3 Ruwheid

3.1 Verf

De metingen werden uitgevoerd met drie spindels, namelijk een blanke spindel *S1*, een gecoate spindel *S2* en een gecoate spindel met straalgrit *S3*. *S2* en *S3* werden geleverd met de anticorrosieve epoxy primer *Sigmacover™ 280 (PPG)*. Dit is een twee-componenten primer bestaande uit een basis, *Sigmacover 280 (PPG) Base Yellow Green* en een verharder *Sigmacover 280 (PPG) Hardener*. De epoxy primer heeft een groene kleur die afkomstig is van de basiscomponent (*Product Data Sheet: Sigmacover™ 280, 2021*). De verf werd klaargemaakt door de basis en de verharder te mengen in een volumeverhouding 80:20 op kamertemperatuur. In volumedelen staat dit gelijk aan 80% basiscomponent tegenover 20% verharder (Duan et al., 2017).

Na het opruwen van het spindeloppervlak met schuurpapier, werd de verf aangebracht op de spindel met een borstel. Dit gebeurde op een droog en schoon cilinderoppervlak. Het aanbrengen van de verf moet binnen een beperkte tijd worden uitgevoerd om te voorkomen dat de verf uithardt voordat de verflaag volledig is aangebracht. De uithardingstijd is sterk afhankelijk van de omgevingstemperatuur en zal korter zijn bij hogere temperaturen (Gibril et al., 2007). Men dient ervan bewust te zijn dat de manier waarop de verf wordt aangebracht op het oppervlak, de viscositeitsmetingen beïnvloedt (Schultz & Myers, 2003). Een coating die met een verfroller wordt aangebracht zal een ruwer oppervlak hebben dan wanneer de verf met een luchtspray wordt aangebracht. Bijgevolg zal dezelfde coating verschillende waarden geven voor de viscositeit. Daarnaast zijn de viscositeitsmetingen ook afhankelijk van de componenten in de verf en de structuur van de coating. Een voorbeeld hiervan zijn microdeeltjes in de verf, die kunnen zorgen voor een verhoging van de microruwheid van een oppervlak (Howell & Behrends, 2006).

De verf is gebaseerd op pure epoxy technologie en biedt hiermee bescherming tegen water en corrosie. In de praktijk wordt deze epoxy coating gebruikt als een effectief beschermingssysteem tegen corrosie en beschadiging van staal en non-ferro metalen. Deze specifieke epoxy verf wordt onder andere toegepast in ballasttanks, ladingruimen, olietanks, op dek, etc.

Het hoofddoel van de epoxy coating is de bescherming van het onderliggend stalen oppervlak tegen corrosie. Corrosie is de hoofdoorzaak van beschadiging van stalen tanks, onderzeese structuren en scheepsconstructies. Twee-componenten epoxy coatings harden uit met behulp van een chemische reactie waardoor een beschermde laag op de metalen constructie wordt gevormd, met als doel het corroderend oppervlak af te sluiten van zuurstof en ionen (*Product Data Sheet: Sigmacover™ 280*, 2021). Deze beschermende laag vermijdt dat elektrochemische reacties tussen staal, water en zuurstof plaatsvinden en verhindert het ontstaan van corrosie. Epoxy coatings vertonen een uitstekende hechting aan het onderliggend oppervlak en staan bekend omwille van hun hoge hardheid. Bovendien bieden deze coatings weerstand tegen oplosmiddelen en chemische reacties die de beschermende laag kunnen aantasten. Deze coatings vinden hun toepassing op locaties waar een langdurige werking en bescherming tegen de genoemde uitdagingen cruciaal is. Desondanks dient er rekening te worden gehouden met het onderhoud van deze harde coating, aangezien de coating tijdens zijn levensduur doorgaans verder zal uitharden (Gibril et al., 2007).

In dit onderzoek wordt een ruw oppervlak gesimuleerd door straalgrit toe te voegen aan de epoxy primer *Sigmacover™ 280* op de S3 spindel. Er wordt gebruik gemaakt van het straalgrit *GH80*. De grootte en de vorm van het straalgrit bepalen de ruwheid van het oppervlak. De hardheid *GH* wijst op een hoekige korrelvorm. De grootte van het straalgrit wordt uitgedrukt in de *Mesh*-grootte. Het *Mesh*-getal, *80*, staat gelijk aan het aantal zeefdraden per oppervlakte-eenheid, meestal uitgedrukt in inch^2 . Dit straalgrit heeft een grootte van *80 Mesh*, wat betekent dat dit straalgrit door een 80 zeef valt. Hoe groter dit *Mesh*-getal, hoe kleiner de openingen in de zeef zijn en hoe fijner de korrels van het straalgrit. *80 Mesh* staat gelijk aan een korrelgrootte van $177 \mu\text{m}$.

Naast bescherming tegen corrosie zijn er ook coatings die bescherming bieden tegen microbiologische *fouling*, bekend als antifouling coatings. Microbiologische *fouling* is de aangroei van microscopische mariene organismen op onderzeese structuren. Een deel van deze organismen veroorzaken met hun aanwezigheid en activiteit corrosie, ook wel bekend als *Microbial Induced Corrosion (MIC)*.

De hoofdoorzaak voor het ontwikkelen van nieuwe anti-fouling coatings is het verbod op het gebruik van zware metalen in antifouling verven. Een voorbeeld hiervan is het verbod op het zéér efficiënte tributyltin (TBT), ingevoerd door de IMO in 2008 omwille van de biociden in de coatings die schade veroorzaakten aan het mariene milieu. Vandaag de dag dreigt dit verbod er ook te komen voor systemen die gebruik maken van biociden die koper of zink bevatten. De reglementeringen rond alternatieve biociden zijn eveneens strenger dan voordien (Pistone et al., 2021).

Wetenschappers zijn op zoek naar milieuvriendelijke alternatieven en ontwikkelen coatings zonder biociden waarvan de efficiëntie gebaseerd is op de fysisch-chemische eigenschappen van het oppervlak. Het manipuleren van oppervlakte-eigenschappen zoals elasticiteitsmodulus of wrijvingscoëfficiënt maakt het voor mariene organismen moeilijker om zich te hechten aan het onderzeese oppervlak. Dit komt doordat de intermoleculaire reacties tussen organismen en onderzeese oppervlakken worden afgezwakt, waardoor ze sneller loskomen en er minder schade wordt aangericht aan de coating. Naast de elasticiteitsmodulus en de wrijvingscoëfficiënt, zijn er nog andere eigenschappen die kunnen worden gemanipuleerd om de hechting van *biofouling* te verminderen. Voorbeelden hiervan zijn de oppervlakteruwheid, de chemische samenstelling en de kleur.

Momenteel zijn deze coatings minder efficiënt dan een antifouling verf op basis van biociden. Om deze alternatieve coatings verder te optimaliseren is er nood aan onderzoeksmethoden die snel en efficiënt zijn. In dit onderzoek wordt een snelle en compacte methode voorgesteld, waarmee eigenschappen van coatings eenvoudig kunnen worden onderzocht (Pistone et al., 2021).

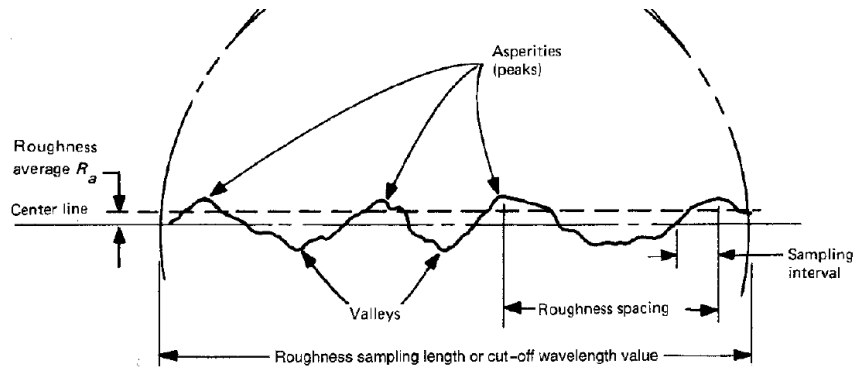
3.2 Oppervlakteruwheidstester

De oppervlakteruwheid is een belangrijk gegeven in de ontwikkeling van nieuwe coatings. Mariene ingenieurs gebruiken deze parameter om de hydrodynamische prestaties van nieuwe coatings te karakteriseren en de microtopografie van een oppervlak te beschrijven. Een grotere oppervlakteruwheid heeft een negatieve invloed op het hydrodynamisch gedrag van een coating. Een ruwer oppervlak zal een grotere wrijvingscoëfficiënt bezitten, sneller slijten en gemakkelijker corroderen (Howell & Behrends, 2006). Daarbij favoriseert een ruwere topografie de aangroei van mariene organismen, waardoor het oppervlak nog ruwer wordt en gevoeliger is voor het ontstaan van corrosie. Deze organismen nestelen zich in imperfecties op de scheepsromp om zich te beschermen tegen de hydrodynamische krachten in hun omgeving. Door de microtopografie te schetsen kan men de toename van *biofouling* op de romp inschatten. Hoe ruwer het oppervlak, hoe groter de kans op *biofouling* en bijgevolg ook op corrosie (Pistone et al., 2021).

3.2.1 Meetsysteem

Oppervlakteruwheid wordt omschreven als de driedimensionale topografie van een oppervlak. Bij een nauwkeurige observatie van een oppervlak worden er onregelmatigheden in de vorm van pieken en dalen waargenomen. Pieken worden gedefinieerd als lokale maxima in een ruwheidsprofiel en dalen zijn lokale minima. Deze onregelmatigheden in het oppervlak worden gekarakteriseerd door het ruwheidsprofiel.

In **Figuur 27** wordt een ruwheidprofiel van dichtbij weergegeven, waarop een paar belangrijke parameters zijn aangeduid. Het ruwheidsprofiel wordt longitudinaal in twee verdeeld door de referentielijn M (*Center line*) en R_a is de gemiddelde ruwheid van een oppervlak. R_a is het rekenkundig gemiddelde van alle absolute waarden van de profielafwijkingen ten opzichte van de referentielijn. De steekproeflengte is de lengte van het oppervlak dat wordt gemeten om de ruwheid van het monster te bepalen. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen microruwheid en macroruwheid (*Surface Texture (Roughness, Waviness, Lay)*, 2020).



Figuur 27 Het ruwheidsprofiel
Bron: Bhushan, 2001

Microruwheid wordt bepaald door het aantal pieken (*peaks*) en dalen (*Valleys*) in het profiel, alsmede de afstand tussen twee opeenvolgende pieken of dalen (*Roughness spacing*) in de steekproeflengte. Microruwheid bestaat uit kenmerken die inherent zijn aan het productieproces. Daarentegen ontstaat macroruwheid door vibraties, hitte, afbuigingen door werken, etc. Macroruwheid bestaat uit een golfpatroon dat op een grootschaliger ruwheidsprofiel terug te vinden is. Dit golfpatroon beschrijft alle onregelmatigheden die groter zijn dan de ruwheidssteekproeflengte (*Roughness sampling length or cutoff wavelength value*) en kleiner zijn dan de golfsteekproeflengte (Bhushan, 2001).

In dit onderzoek werd de oppervlakteruwheid gemeten met behulp van de *Mitutoyo Surfptest® SJ-310 Surface Roughness Tester*, welke geleverd werd door Mitutoyo America Corporation en is afgebeeld in **Figuur 28**. Dit toestel meet de oppervlakteruwheid in micrometer [μm] en toont het ruwheidsprofiel op het display ('Surftest SJ-310 [Mm]', z.d.).



Figuur 28 Mitutoyo Surfptest SJ-310 Roughness tester
Bron: 'Surftest SJ-310 [Mm]', z.d.

De *Surftest SJ-310* is compatibel met verscheidene ruwheidsstandaarden, zoals ISO 1997, JIS B0601 2001, JIS B0601 1994, JIS B0601 1982, VDA en ANSI. Het toestel kan geconfigureerd worden naar zestien talen en wordt vergrendeld met een wachtwoord. De ruwheidsmeter bestaat uit een hoofdeenheid en een meetinstrument. Het meetinstrument is verbonden via een kabel aan de hoofdeenheid. De hoofdeenheid bezit een gekleurd lcd-touchscreen scherm met een ingebouwde printfunctie. Het scherm heeft een diagonale schermmaat van 14,5 cm waarop metingen in kleur worden weergegeven voor een optimale aflezing en bediening door de gebruiker. Het toestel heeft geen aansluiting op de netspanning nodig, waardoor metingen op elke locatie kunnen worden afgenomen.

Het toestel heeft de mogelijkheid om tot tien verschillende meetomstandigheden op te slaan. Indien er een micro SD-kaart wordt ingestoken, kan het apparaat tot vijfhonderd meetomstandigheden opslaan. De ruwheidsmeter heeft een resolutie van 0,002 μm bij een meetbereik van 25 μm en bezit hiermee een hoge mate van nauwkeurigheid. De meetsnelheid kan een maximum bereiken van 0,75 mm/s. Het meetinstrument gebruikt de inductiemethode om metingen uit te voeren. Door middel van de RS-232 C interface kan de oppervlakteruwheidstester worden aangesloten op een computer of laptop. Het is ook mogelijk om een software te downloaden en de gegevens over te dragen via een USB-datakabel naar een laptop. In dit onderzoek werd er geen gebruik gemaakt van de software, noch van een laptop.

Het toestel geeft drie ruwheidsprofielen weer, namelijk R_a , R_z en R_q . Daarnaast kunnen de metingen ook worden weergegeven in BAC of ACD-grafieken. De *Surftest SJ-310* maakte het mogelijk om statistische analyses uit te voeren op de bekomen waarden. Het apparaat berekende de gemiddelde waarde, de standaarddeviatie, het maximum, het minimum, het slagingspercentage en gaf een histogram weer. Alle resultaten werden afgedrukt door middel van de thermische printer.

Tabel 7 is een weergave van de producteigenschappen van de Mitutoyo SJ-310 ruwheidstester ('*Surftest SJ-310 [Mm]*', z.d.).

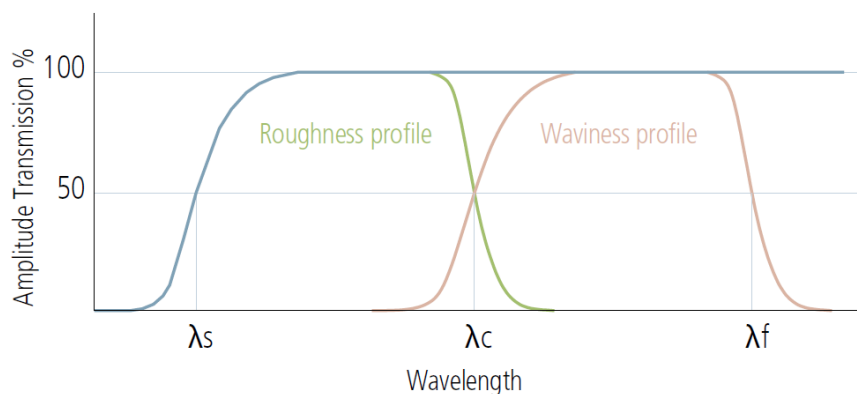
Tabel 7 Productspecificaties Mitutoyo Surftest® SJ-310 Surface Roughness Tester
Bron: 'Surftest SJ-310 [Mm]', z.d.

Productspecificaties Mitutoyo Surftest® SJ-310 Surface Roughness Tester

| | |
|--------------------------------------|---|
| <i>Inch-Metriek</i> | Metriek |
| <i>Kabellengte</i> | 1m |
| <i>Meetkracht van Meetinstrument</i> | 0,75 mN |
| <i>Invalshoek van de sensor</i> | 60° |
| <i>Straal van de sensor</i> | 2 µm |
| <i>Meetmethode</i> | Inductiemethode |
| <i>Meetsonde</i> | Diamant stilus |
| <i>Straal van de hoofdeenheid</i> | 40 mm |
| <i>Meetkracht</i> | 0,75 mN |
| <i>Interface</i> | RS-232 C interface voor ingang/uitgang, DIGIMATIC-uitgang, Compact Flash-kaart |
| <i>Profielen</i> | Primair profiel (P), Ruwheidsprofiel (R), DIN4, 776, MOTIF |
| <i>Parameters en hun bereik</i> | R_a, R_q : 0,01 µm-100 µm $R_y, R_z, R_t, R_v, R_{3z}, R_k, R_{pk}, R_{vk}, R_p, R_x,$ R, AR, W, W_x, W_{te} : 0,02 µm-350 µm S, S_m : 2 µm - 4000 µm HSC, P_c : 2,5/cm – 5000/ cm; P_{ppi} : 6,35-12700/inch dc : -350 µm - +350 µm L_o : 0,1 mm – 99999 mm mr, M_{r1}, M_{r2} : 0 – 100% A_1, A_2 : 0 – 15000 |
| <i>Ruwheidsstandaard:</i> | EN ISO, VDA, ANSI, JIS |
| <i>Steekproeflengte L</i> | x 1, x 3, x 5, x Lr |
| <i>Digitale filter</i> | 2RC-75%, 2RC-75% (faseverschuiving gecorrigeerd), Gauss-50% |
| <i>Cutoff lengte</i> | λ_c : 0,08 mm : 0,25 mm ; 0,8 mm ; 2,5 mm ; 8 mm λ_s : 2,5 µm; 8 µm; 25 µm |

| | |
|-------------------|---|
| <i>Printer</i> | Thermische printer (Printbreedte: 48 mm) |
| <i>Statistiek</i> | Max/Min, gemiddelde waarde, standaarddeviatie (s), slaginspercentage, histogram |
| <i>Auto-slaap</i> | Automatisch na 5 minuten |
| <i>Tolerantie</i> | Bovenste/ onderste limit waarden voor drie parameters |
| <i>Massa</i> | 1,7 kg |

Met de ruwheidstester werd hoofdzakelijk de gemiddelde ruwheid van een oppervlak bepaald, maar er kunnen nog andere parameters gemeten worden. In **Figuur 29** zijn de drie ruwheidsprofielen weergegeven, met name het primair profiel in het blauw, het ruwheidsprofiel in het groen (*Roughness profile*) en het golfprofiel in het roze (*Waviness profile*). Op de *x*-as staat de golflengte afgebeeld en op de *y*-as is de amplitude uitgezet die de filter doorlaat.

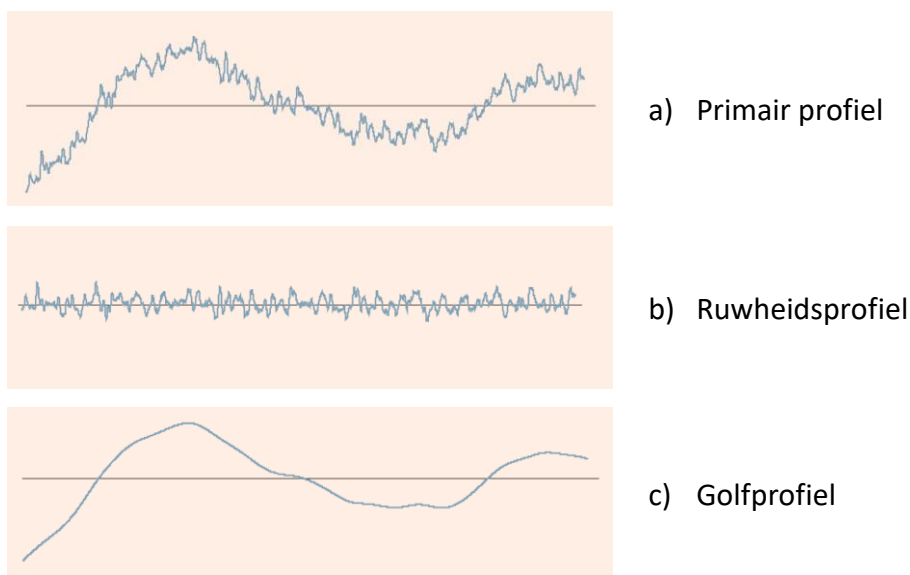


Figuur 29 Profielen van de SurfTest SJ-310
Bron: Quick Guide to Precision Measuring Instruments, 2016

Figuur 29 differentieert het ruwheidsprofiel en het golfprofiel met behulp van de cutoff lengte λ_c . De cutoff lengte is een vooraf bepaalde golflengte die een onderscheid maakt tussen het primair profiel, ruwheidsprofiel en het golfprofiel. Het is een belangrijke parameter tijdens het meten van oppervlakteruwheden, omdat het de golflengte bepaalt waarboven de ruwheidparameters worden gemeten. Hetzelfde gebeurt tussen het primair profiel en het ruwheidsprofiel met de cutoff lengte λ_s (Bhushan, 2001).

De ruwheidstester zet éérst het getraceerde oppervlak om naar een primair profiel. Dit gebeurt met een laagdoorlaatfilter voor cutoff lengte λ_s . Alle golflengten die kleiner zijn dan λ_s worden doorgelaten en omgekeerd worden alle langere golflengten verwijderd. Het ruwheidsprofiel wordt bekomen door een hoogdoorlaatfilter voor cutoff-waarde λ_s toe te passen op het primair profiel. Alle golflengten groter dan λ_s worden dan doorgelaten. Het golfprofiel wordt bekomen door een band-pass filter toe te passen op het primair profiel, die alle golflengten tussen λ_c en λ_f doorlaat (Howell & Behrends, 2006).

Figuur 30 illustreert de drie ruwheidsprofielen. De waarden van λ_s en λ_c zijn af te lezen in **Tabel 7**. λ_s en λ_c worden bepaald door de straal van de stilus. In dit onderzoek, waar de stilus een straal heeft van $2 \mu m$, was λ_s gelijk aan $2,5 \mu m$. Voor λ_c is er keuze uit $0,08 \mu m$, $0,25 \mu m$ of $0,8 \mu m$. In dit onderzoek werd $0,8 \mu m$ gekozen voor de waarde van λ_c .

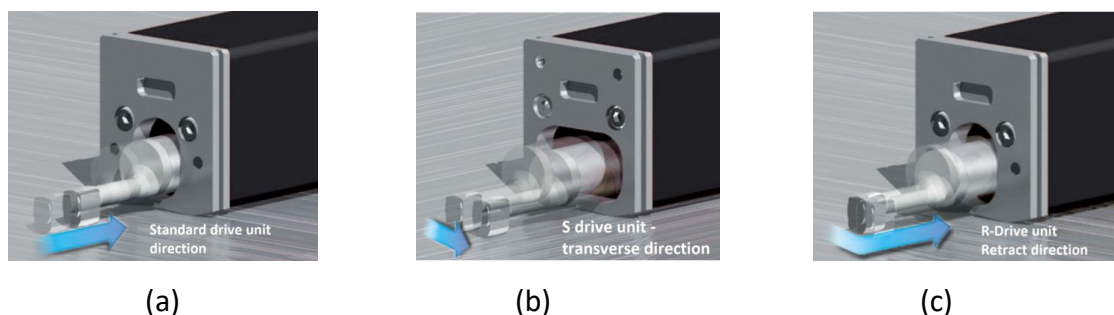


Figuur 30 Drie ruwheidsprofielen
Bron: Quick Guide to Precision Measuring Instruments, 2016

Door te variëren met de cutoff lengte kunnen meerdere ruwheidsprofielen worden bestudeerd, zoals weergegeven op **Figuur 30**. Door een kleinere cutoff lengte te selecteren, zal men meer gaan inzoomen op het profiel waardoor meer details van het oppervlak zichtbaar worden (*Quick Guide to Precision Measuring Instruments*, 2016).

Het meetinstrument bestaat uit een inductiesonde met een diamant-stilus en een aandrijvingseenheid. De aandrijving laat de diamant stilus gelijkmatig over het oppervlak glijden, waardoor de stilus in staat is het oppervlak te scannen. De meetsonde heeft een punt met een straal van $2\ \mu\text{m}$ en wordt onderworpen aan een meetkracht van $0,75\ \text{mN}$. De maximale steekproeflengte in μm wordt bepaald door de straal van de stilus en de cutoff-waarde van het ruwheidsprofiel λ_c . De invalshoek van dit punt bedraagt 60° . Het instrument beschikt over een hoge flexibiliteit dankzij het aanbod van elf uitwisselbare sensoren, waaronder sensoren voor kleine openingen of tandwielen.

Figuur 31 toont de drie verschillende aandrijvingen, met name de standaard aandrijvingseenheid (a), de R-aandrijving (b) en de S-aandrijving (c). De standaard aandrijvingseenheid beweegt van voor naar achter en omgekeerd over een oppervlak. De S-aandrijving, ook wel de *transverse direction drive unit* genoemd, beweegt in de dwarsrichting en is ideaal voor metingen op smalle oppervlakken. De laatste aandrijving is de R-aandrijving of *Retract direction drive unit*. Hier kan de pen ingevoegd worden in ruimtes die niet meteen zichtbaar zijn. De pen wordt eerst boven de gewenste vlakke gebracht, waarna het gaat rusten op het oppervlak om de meting te beginnen ('New SurfTest® SJ-310 Surface Roughness Tester', z.d.).



Figuur 31 Aandrijfeenheden meetinstrument SJ-310
Bron: Bewerkt van 'SurfTest SJ-310 [Mm]', z.d.

Terwijl de inductiesonde over het oppervlak beweegt, wordt de diamant-sensor verschoven door de oneffenheden. De meetwaarden, die bepaald zijn door de verschuiving van de sensor, worden met behulp van inductie op het scherm weergegeven.

Het profiel, dat getraceerd werd door de sensor, wordt omgezet naar een primair profiel door overbodige data te verwijderen. Hierna wordt het primair profiel vernauwd naar het ruwheidsprofiel. Deze golfvorm verscheen op het scherm samen met een schaal en een liniaal voor een gedetailleerde analyse. Op het ruwheidsprofiel worden de ruwheidsparameters toegepast, die het profiel beschrijven (*Quick Guide to Precision Measuring Instruments*, 2016).

3.2.2 Ruwheidsparameters

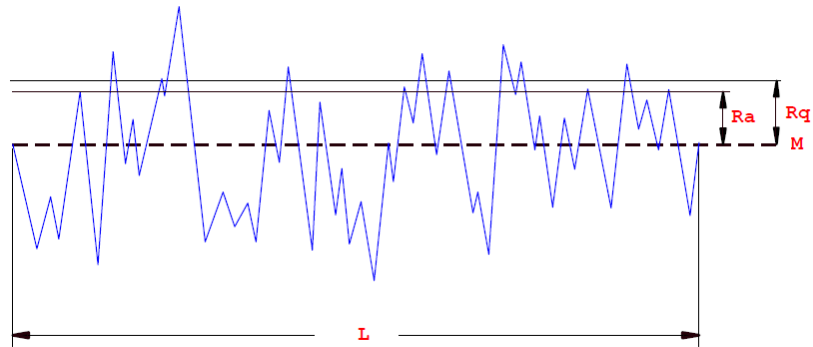
De parameters worden beschreven in vier categorieën, opgesomd in **Tabel 8**. Het meetbereik van deze parameters wordt getoond in **Tabel 7**. Alle parameters worden gemeten in micrometers [μm] (*Quick Guide to Precision Measuring Instruments*, 2016).

Tabel 8 De vier categorieën van parameters die ruwheid beschrijven
Bron: Quick Guide to Precision Measuring Instruments, 2016

- Parameters die iets vertellen over de amplitude: gemiddelde waarden
- Parameters die iets vertellen over de amplitude: pieken en dalen
- Parameters die iets vertellen over de afstand tussen de pieken en dalen
- Krommen en parameters die gerelateerd zijn aan kansdichtheid

3.2.2.1 Gemiddelde waarden van de amplitude

De eerste categorie beschrijft de gemiddelde amplitudes van de pieken en dalen, waar de belangrijkste parameters de gemiddelde ruwheid R_a en zijn kwadratisch gemiddelde R_q zijn. Beide parameters worden voorgesteld in **Figuur 32**. De gemiddelde ruwheid is het rekenkundig gemiddelde van de absolute waarden van de profielhoogten en -laagten over de hele steekproeflengte. Pieken en dalen worden bepaald ten opzichte van de referentielijn M . De referentielijn M wordt bepaald door de digitale filter aan de hand van de steekproeflengte en de cutoff-waarde. De monsterlengte L is de lengte waarover de meetwaarden worden geëvalueerd en bestaat idealiter uit vijf steekproeflengten om een nauwkeuriger resultaat te krijgen. R_q meet de wortel-gemiddelde-kwadraatafwijking van een profiel (*Surface Texture (Roughness, Waviness, Lay)*, 2020).



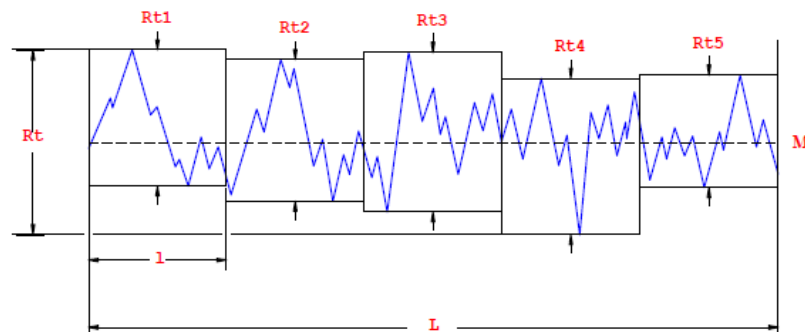
Figuur 32 Definitie R_a en R_q

Bron: Surface Roughness Terminology and Parameters, z.d.

Indien de pieken en dalen groot zijn, zal R_a groter zijn. Dit staat gelijk aan een ruwer oppervlak. Omgekeerd zal een kleine R_a wijzen op een glad oppervlak. Omdat R_a een gemiddelde is, kunnen diverse ruwheidsprofielen dezelfde waarde voor R_a hebben. Omdat R_a en R_q niet genoeg vertellen over de pieken en dalen in het profiel, is er nog een tweede categorie van parameters waarmee rekening wordt gehouden.

3.2.2.2 Pieken en dalen

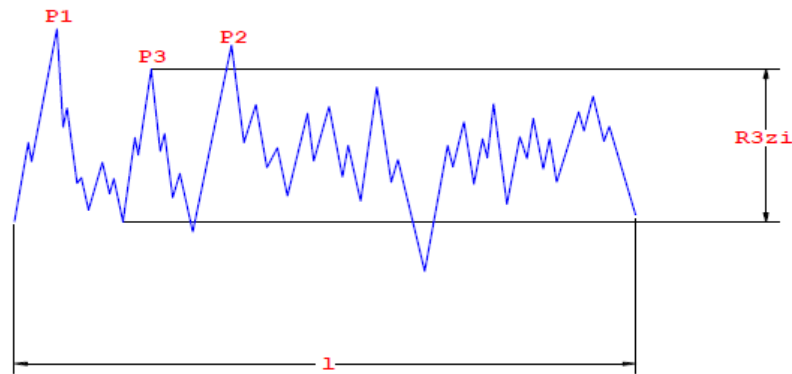
R_z , R_{ti} , R_t , R_{3z} , R_p en R_v zijn parameters die de amplitude meten van de pieken en dalen. Op **Figuur 33** is de monsterlengte L onderverdeeld in vijf segmenten, voorgesteld door een afstand l . R_t is de maximale profielhoogte en is het verschil tussen de hoogste piek en het laagste dal in één monsterlengte. R_{ti} is de maximale profielhoogte in één segment en meet de verticale afstand tussen de grootste profielhoogte en -laagte (*Quick Guide to Precision Measuring Instruments*, 2016).



Figuur 33 Definitie R_t en R_z

Bron: Surface Roughness Terminology and Parameters, z.d.

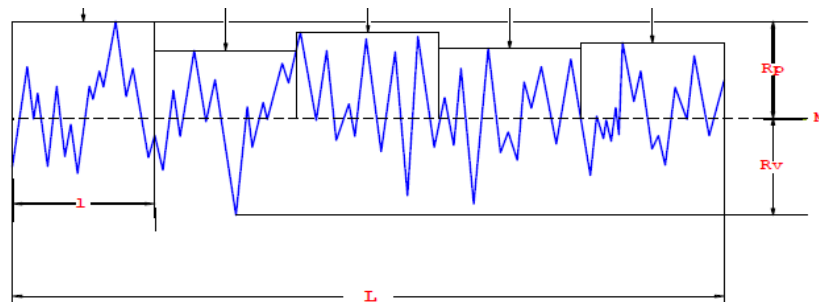
R_z is de gemiddelde maximale hoogte van het ruwheidsprofiel en wordt berekend door het gemiddelde te nemen van de R_{ti} -waarden over de gehele evaluatielengte. R_{3z} is het gemiddelde van de derde grootste afstand tussen piek en dal zoals aangetoond in **Figuur 34** (*Roughness Measurements of Stainless Steel Surfaces*, 2014).



Figuur 34 Definitie R3z

Bron: Surface Roughness Terminology and Parameters, z.d.

R_p en R_v , voorgesteld in **Figuur 35**, zijn de maximale piekhoogte en het maximale dal diepte. Het is de verticale afstand tussen M en de hoogste en laagste piek in het ruwheidsprofiel (*Quick Guide to Precision Measuring Instruments*, 2016).

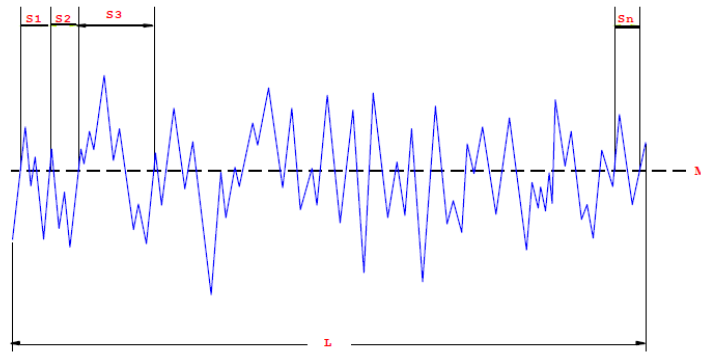


Figuur 35 Definitie Rp en Rv

Bron: Surface Roughness Terminology and Parameters, z.d.

3.2.2.3 Afstand parameters

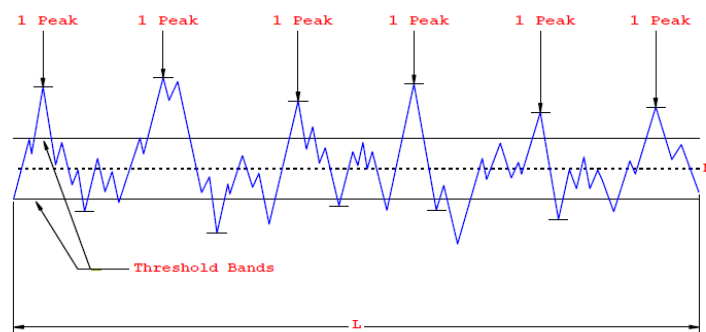
De derde categorie vertelt meer over de afstand tussen de pieken en dalen in het ruwheidsprofiel. S_m meet de gemiddelde waarde van de afstand tussen de profielonregelmatigheden. Het is het rekenkundig gemiddelde van $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$, voorgesteld op **Figuur 36**.



Figuur 36 Definitie S_m

Bron: Surface Roughness Terminology and Parameters, z.d.

P_c is de piekdichtheid en meet het aantal SAE pieken voor één steekproeflengte, te zien op **Figuur 37**. SAE-pieken zijn onregelmatige pieken in het profiel die de drempelwaarde overschrijden, voorgesteld door de twee volle lijnen boven en onder de referentielijn M .

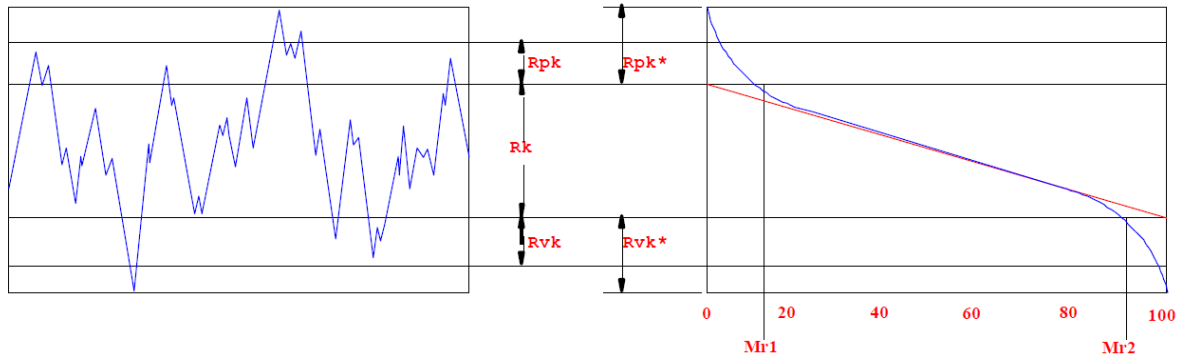


Figuur 37 Definitie P_c

Bron: Roughness Measurements of Stainless Steel Surfaces, 2014

3.2.2.4 Curven en parameters gerelateerd aan kansdichtheid

De rechtergrafiek op **Figuur 38** is een BAC-curve, waar R_k de kernhoogte is langs de y -as en wordt bekomen door een 40% lijn op de kromme te plaatsen waar de richtingscoëfficiënt het kleinst is. Deze lijn wordt doorgetrokken naar 0% en 100% van de steekproeflengte. R_{pk} is de verminderde piekhoogte en R_{vk} is het verminderde dal diepte. R_{pk} is de hoogte langs de y -as van een rechthoek met hetzelfde oppervlak als BAC-curve van het 0% punt tot het M_{r1} punt. Idem dito, is de R_{vk} de hoogte langs de y -as van een rechthoek met hetzelfde oppervlak als BAC-curve van het M_{r2} punt tot het 100% punt (*Quick Guide to Precision Measuring Instruments*, 2016).



Figuur 38 Definitie Rk , Rpk en Rvk
 Bron: Surface Roughness Terminology and Parameters, z.d.

3.3 Resultaten

De oppervlakteruwheid van de drie spindels werd gemeten met behulp van de SJ-310 ruwheidstester. Er werd verwacht dat de oppervlakteruwheid van $S1$ en $S2$ gelijkaardige waarden zouden hebben, omdat een coating gaat nivelleren tijdens het droogproces. Door de toevoeging van straalgrit in de coating van $S3$, werd verwacht dat de oppervlakteruwheid groter zou zijn dan bij $S1$ en $S2$. Een grotere oppervlakteruwheid zorgt voor een grotere coëfficiënt van de torsie, wat te zien was in de viscositeitsmetingen (Weinell et al., 2003). De ruwheidstester en de spindel werden op twee voeten gemonteerd. De hele opstelling in **Figuur 39** stond waterpas.



Figuur 39 Opstelling ruwheidstester
Bron: Eigen werk

Om het oppervlak nauwkeurig te schetsen werden drie parameters gemeten, namelijk R_a , R_q en R_z . R_a , R_q en R_z werden op vier plaatsen op het oppervlak gemeten zoals voorgesteld in **Figuur 40** door de punten A, B, C en D. Om een correct beeld te vormen, werd elke meting vijf keer uitgevoerd, waarna de spindel een kwartslag werd gedraaid in wijzerzin. Zo werden alle metingen vijf keer herhaald tot alle punten op het oppervlak waren gemeten. Met behulp van de R-aandrijving op het meetinstrument werd de oppervlakteruwheid gemeten in de richting van de rode pijl op **Figuur 40**. De stilus bewoog van de bovenkant van de spindel naar de onderkant en kwam vervolgens terug naar het beginpunt. Eén meting stond gelijk aan één heen-en-weer beweging van de stilus.






Figuur 40 Ruwheidsmetingen op de R1

Bron: Bewerkt van 'Replacement Spindles for Brookfield Rotational Viscometers', z.d.

Voor één spindel werden er twintig metingen verzameld, waar een statistische analyse op werd toegepast door de ruwheidstester. De verworden data worden voorgesteld in **Tabel 9**.

Tabel 9 Voorstelling spindels

Bron: Eigen werk

| S1 | S2 | S3 |
|---|---|---|
|  |  |  |
| Blanke cilinder | Cilinder met <i>Sigmacover</i>TM 280 | Cilinder met <i>Sigmacover</i>TM 280 en straalgrit GH80 |
| R_a : 1,458 μm R_q : 1,660 μm R_z : 5,932 μm | R_a : 1,328 μm R_q : 1,655 μm R_z : 6,656 μm | R_a : $\geq 25 \mu m$ |
| SD: 0,050 μm Min R_a : 1,394 μm Max R_a : 1,594 μm | SD: 0,360 μm Min R_a : 0,969 μm Max R_a : 1,916 μm | |
| λ_c : 0,8 mm | λ_c : 0,8 μm | λ_c : 0,8 μm |

Het apparaat berekende de standaarddeviatie SD , de minimale gemiddelde ruwheid en de maximale gemiddelde ruwheid. Aangezien de ruwheidstester niet werd gebruikt voor $S3$, gebeurde er geen statistische analyse voor deze spindel.

In **Tabel 9** ziet men een minimaal verschil in de gemiddelde ruwheid tussen $S1$ en $S2$, waarbij R_a voor $S1$ iets hoger ligt. De waarden voor R_q volgen dezelfde trend als de waarden voor R_a . De gemiddelde maximale hoogte R_z , is voor het oppervlak van $S2$ hoger dan bij $S1$. R_z vertelt meer over de amplitude van de pieken in het ruwheidsprofiel. Dit toont aan dat de pieken en dalen in het oppervlak van $S2$ meer uitgesproken zijn dan bij $S1$, ondanks dat de gemiddelde ruwheid R_a lager ligt. Dit wordt bevestigd door de minimale en de maximale gemiddelde ruwheid in de statische analyse. Waarbij het oppervlak van $S1$ oneffenheden bevat tussen $[1,394 \mu m; 1,594 \mu m]$ en het oppervlak van $S2$ tussen $[0,969 \mu m; 1,916 \mu m]$. Daarnaast heeft $S2$ een grotere standaarddeviatie dan $S1$: $0,360 \mu m$ ten opzichte van $0,050 \mu m$. Dit toont aan dat er grotere onderlinge verschillen zijn tussen de ruwheidselementen in het ruwheidsprofiel van $S2$. Ondanks dat de gemiddelde ruwheid van $S2$ lager is dan voor $S1$, bevat het ruwheidsprofiel meer oneffenheden.

De oppervlakteruwheid van $S3$ kon niet gemeten worden met de SJ-310 ruwheidstester, omdat het buiten het meetbereik van het toestel viel. Voor $S3$ werd een schatting gemaakt van de oppervlakteruwheid met behulp van een ISO-comparator, voorgesteld in **Figuur 41**. Een ISO-comparator werkt op zicht en gevoel, waarbij het oppervlak van de spindel vergeleken werd met de monsters op de ISO-comparator. Voor elk monster op de ISO-comparator is R_a op voorhand bepaald in μm . Er wordt een onderscheid gemaakt tussen de linkerkant A en de rechterkant B. A staat symbool voor oppervlakken met een ruwe korrel en B symboliseert oppervlakken met een fijne korrel. De ruwste oppervlakken bevinden zich bovenaan de ISO comparator (N11) en verminderen naarmate Ni daalt (*ISO 8503*, 2012). N11 met een grove korrel A sluitte het dichtst aan bij het oppervlak van $S3$. Dit betekent dat R_a voor $S3$ gelijk of groter is dan $25 \mu m$. $S3$ voelde heel wat ruwer aan dan N11, waardoor geschat wordt dat R_a veel groter is dan $25 \mu m$.



Figuur 41 ISO-comparator
Bron: Eigen werk

Tabel 7 definieert een meetbereik voor R_a en R_q tussen $0,01 \mu m$ en $100 \mu m$. Voor R_z ligt het meetbereik tussen $0,02 \mu m$ en $350 \mu m$. Hier kan men uit afleiden dat de waarden voor R_a en R_q groter zijn dan $100 \mu m$ en voor R_z groter dan $350 \mu m$. In het kader van dit onderzoek werd enkel rekening gehouden met de waarden van de ISO-comparator voor het ruwheidsprofiel van $S3$.

De proeven werden doorlopen met de HAAKE viscotester D en drie spindels $S1$, $S2$ en $S3$, waarbij $S1$ representatief is voor een glad oppervlak en $S3$ het ruwste oppervlak voorstelt. Het ruwe oppervlak van $S3$ symboliseert de schade aan de scheepsromp in de vorm van corrosie en de aangroei van *fouling* op het scheepsoppervlak. Door metingen uit te voeren met $S2$ kunnen de hydrodynamische prestaties van de verf worden bestudeerd. Indien deze verf meer weerstand biedt in het fluïdum dan $S1$ door zijn topografie, zal dit te zien zijn in hogere viscositeitswaarden. Het doel van dit onderzoek is om met deze resultaten meer inzicht te krijgen in de invloed van de ruwheid op de viscositeitsmetingen.

4 Experiment

Er werden twee oplossingen voorbereid, namelijk natriumchloride-oplossingen en water-glycerineoplossingen. De eerste metingen worden uitgevoerd met S1 in kraantjeswater en in natriumchloride-oplossingen. Daarna werden metingen uitgevoerd met de drie spindels in vijf verschillende waterige glycerineoplossingen (*M1*, *M2*, *M3*, *M4* en *M5*).

Tijdens de metingen in de natriumchloride-oplossingen werd een rotatiesnelheid van 200 RPM gehanteerd. Dezelfde rotatiesnelheid werd gebruikt bij de water-glycerine mengsels *M1* en *M2*. In *M3*, *M4* en *M5* wou de rotatieviscosimeter geen metingen afnemen aan een snelheid van 200 RPM, omdat de waarden te ver buiten het meetbereik vielen. Hier was het niet mogelijk om de rotatiesnelheid constant te houden tussen de verschillende mengsels. Bijgevolg worden de waarden enkel vergeleken in éénzelfde mengsel. Om binnen het meetbereik te blijven werden de rotatiesnelheden aangepast aan de densiteit. Volgende rotatiesnelheden worden gebruikt: 100 RPM voor *M3*, 60 RPM voor *M4* en 5 RPM voor *M5*.

Alle metingen werden uitgevoerd op kamertemperatuur. Bij de natriumchloride-oplossingen varieerde de kamertemperatuur tussen 20,6°C en 20,7°C. Aangezien de variatie kleiner is dan 0,2°C, werden deze temperaturen aanvaard. Voor de vijf water-glycerine mengsels bedroeg de kamertemperatuur tussen 20,3°C en 21,4°C, maar de variatie van 0,2°C werd binnen elk mengsel gerespecteerd (*ISO 2555*, 2018).

De viscositeitswaarden van de natriumchloride-oplossingen en de waterige glycerineoplossingen *M1*, *M2* en *M3* vielen buiten het meetbereik van de viscositeitsmeter. Ondanks deze tegenslag, werden deze metingen toch in acht genomen, om de invloed van de ruwheid op de viscositeit te bestuderen. De bekomen metingen werden telkens vergeleken met de theoretische viscositeit. Indien men metingen wil uitvoeren in een lage viscositeit, dient men gebruik te maken van een capillaire of een vallende bal (Höppler) viscositeitsmeter (Michal et al., 2017).

4.1 Testfluida

4.1.1 Natriumchloride-oplossing

Er werden vier natriumchloride-oplossingen voorbereid, bestaande uit kraantjeswater met 10g *NaCl*, 20g *NaCl*, 30g *NaCl* en 35g *NaCl*. De natriumchloride-oplossingen namen geleidelijk aan toe in concentratie tot 3,5 wt%. Zoals eerder vermeld, benadert de natriumchloride-oplossing met een massafractie van 3,5% *NaCl* de kinematische viscositeit en osmotische druk van zeewater (Dennington et al., 2021). Massaprocent is de verhouding tussen de massa van de opgeloste stof en de totale massa in gram. Het massaprocent werd berekend met vergelijking (12). De massa werd berekend aan de hand van het volume en de dichtheid.

$$wt\% = \frac{\text{Massa van de component}}{\text{Totale massa van het monster}} \quad (12)$$

Waarbij:

wt% Massaprocent [%]

Er werd telkens één liter water afgemeten in een maatcilinder en vervolgens in de maatbeker gebracht. De hoeveelheid zout werd afgemeten met een precisieweegschaal en in de maatbeker gestrooid. Er werd doorgrondig geroerd zodat het zout efficiënt in het water kon oplossen. De samenstelling werd uitgedrukt in massaprocenten wt% in **Tabel 10**. Ook de densiteit en de theoretische dynamische viscositeit wordt weergegeven in **Tabel 10**.

Tabel 10 Samenstelling van de natriumchloride-oplossingen met hun densiteit en theoretische dynamische viscositeit
Bron: Eigen werk

| Samenstelling | <i>NaCl</i> [wt%] | Densiteit [<i>g/cm</i> ³] | Dynamische viscositeit [<i>mPa. s</i>] |
|----------------------------------|----------------------|--|---|
| Kraantjeswater | 0,0 | 1,000 | 1,00 |
| Kraantjeswater + 10g <i>NaCl</i> | 1,0 | 1,0051 | 1,02 |
| Kraantjeswater + 20g <i>NaCl</i> | 2,0 | 1,0122 | - |
| Kraantjeswater + 30g <i>NaCl</i> | 3,0 | 1,0194 | - |
| Kraantjeswater + 35g <i>NaCl</i> | 3,5 | 1,0230 | 1,07 |

Merk op dat de dichtheid van de natriumchloride-oplossing met concentratie 3,5 wt% iets lager is dan de dichtheid van zee water (**Tabel 4**). De viscositeitswaarden voor de natriumchloride-oplossingen met 2,0 wt% en 3,0 wt% NaCl werden niet gevonden en staan daarom niet in **Tabel 10**. Deze waarden liggen tussen 1,02 mPa.s en 1,07 mPa.s.

4.1.2 Waterige glycerineoplossingen

4.1.2.1 Glycerol

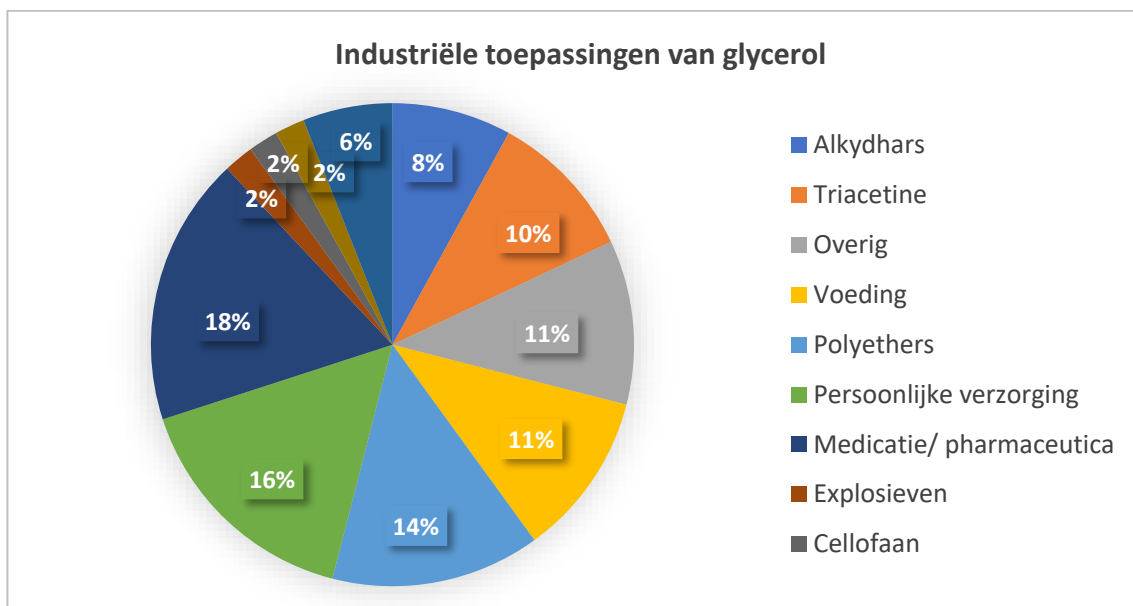
Glycerol, ook wel bekend als glycerine of 1,2,3-propaantriol, is een heldere en stroperige vloeistof met een zoete smaak. Het is een alcohol met een lage toxiciteit, die kleurloos en geurloos is. Deze organische verbinding bestaat uit drie koolstofverbindingen met aan elke koolstof een hydroxylgroep (Takamura et al., 2012). Deze drie hydroxylgroepen zorgen voor een hygroscopische aard, waardoor glycerol volledig oplosbaar is in water. **Tabel 11** is een voorstelling van de fysische eigenschappen van glycerol. De hoge waarden voor de viscositeit en het kookpunt zijn te wijten aan de intermoleculaire waterstofbruggen. Door de aanwezigheid van waterstofbruggen tussen de glycerolmoleculen zijn de viskeuze krachten in glycerol sterk aanwezig. Glycerol absorbeert vochtigheid uit de lucht, maar wordt niet aangetast door de lucht. Dit is een chemisch stabiele vloeistof wanneer het met de nodige zorg behandeld en bewaard wordt (Tan et al., 2013).

Tabel 11 Fysische eigenschappen van glycerol
Bron: Tan et al., 2013 en Takamura et al., 2012

| Fysische eigenschappen van zuivere glycerol onder normale atmosferische druk en bij kamertemperatuur | |
|---|-------------------------|
| Chemische formule | $C_3H_8O_3$ |
| Moleculaire massa | 92,09 g/mol |
| Kookpunt | 290 °C |
| Vriespunt/ smeltpunt | 18 °C |
| Vlampunt | 177 °C |
| Dichtheid | 1,261 g/cm ³ |
| Viscositeit | 1,5 Pa.s |
| Oppervlaktespanning | 63,4 dyn/cm |

Glycerol is voornamelijk een nevenproduct dat ontstaat bij de productie van biodiesel en het vervaardigen van zeep. Voor elke *kg* biodiesel die wordt geproduceerd, ontstaat 0,10 *kg* glycerol. Dit nevenproduct is zeer waardevol door de tal van industriële toepassingen waarin het wordt vervaardigt (Kaur et al., 2020).

Figuur 42 geeft een overzicht weer van alle industriële toepassingen voor glycerol. **Figuur 42** toont aan dat de farmaceutische industrie één van de sectoren is die glycerol het meest gebruikt. Glycerol wordt toegepast bij het oplossen van geneesmiddelen, om de vochtigheidsgraad van pillen te verhogen en om siropen viskeuzer te maken. Het wordt teruggevonden in onder andere hoestsiroop, capsules van medicijnen en medicatie voor oorinfecties waar het dient als draagstof voor antibiotica.



Figuur 42 Industriële toepassingen van glycerol
Bron: Bewerkt van Tan et al., 2013

Glycerol wordt ook vaak toegepast in persoonlijke verzorging. Het is bijvoorbeeld een hoofdingrediënt van tandpasta, met als doel de uitdroging en verharding van de tandpasta tegen te gaan. Glycerol vindt hier ook toepassingen als vochtinbrenger in haarverzorgingsproducten en huidverzorging (Kaur et al., 2020). In de voedingsindustrie wordt glycerol voornamelijk gebruikt als zoetstof, oplosmiddel of als bewaarmiddel. Het is terug te vinden in bijvoorbeeld thee, koffie en gebak. Daarnaast heeft glycerol nog vele andere toepassingen.

Door de recente stijging van de biodieselpductie, wordt er meer glycerol geproduceerd. Men is op zoek naar nieuwe toepassingen om dit product in te verwerken. Glycerol is eetbaar en biologisch afbreekbaar, waardoor het zeer voordelig is voor het milieu. (Tan et al., 2013).

4.1.2.2 Water-glycerine mengsels

De glycerol die werd gebruikt in dit onderzoek bezit een zuiverheid van 99,5% en werd geleverd door *Airogroup*. In dit experiment werden water-glycerol mengsels voorbereid in vijf verschillende concentraties. De mengsels werden bestempeld, volgens toenemende glycerine concentratie, als M1, M2, M3, M4 en M5.

Tabel 12 toont de samenstelling van de verschillende mengsels. Het massaprocent *wt%* is een maat voor de concentratie glycerine in de oplossing, waarbij de massa werd berekend aan de hand van het volume en de dichtheid. Voor demiwater is dit een dichtheid $1,000 \text{ g/cm}^3$, en voor glycerine, $1,260 \text{ g/cm}^3$.

Tabel 12 Samenstelling van de water-glycerol mengsels
Bron: Eigen werk

| Mengsel | H ₂ O [mL] | Glycerine [mL] | H ₂ O [wt%] | Glycerine [wt%] |
|-----------|-----------------------|----------------|------------------------|-----------------|
| M1 | 800 | 200 | 76,0 | 24,0 |
| M2 | 600 | 400 | 54,3 | 45,7 |
| M3 | 400 | 600 | 34,6 | 65,4 |
| M4 | 200 | 800 | 16,6 | 83,4 |
| M5 | 0 | 1000 | 0,5 | 99,5 |

Deze waterige glyceroloplossingen werden op voorhand bereid, om de metingen te vergemakkelijken en een homogene temperatuur van het fluïdum te garanderen. Een kleine exotherme reactie werd waargenomen bij het mengen van water en glycerine.

Het totale volume van het monster was 1L, bestaande uit een volumedeel demiwater en een volumedeel glycerine.

Het nodige volume demiwater en glycerine werd afgemeten in een maatcilinder en vervolgens samengebracht in een maatbeker van 1L, waar de glycerine kon oplossen in het water. Deze twee vloeistoffen mengen zich zonder opvallende veranderingen in hun partieel molair volume. Het totaal volume van de mengsels zal weinig veranderen en bijgevolg werd hier geen rekening mee gehouden (Takamura et al., 2012).

Doordat de concentratie van glycerol in de oplossingen toeneemt, zal ook de densiteit van de mediums verschillen. **Tabel 13** geeft de densiteit weer voor elk mengsel bij elke testtemperatuur. De densiteit stijgt quasilineair met de glycerolconcentratie. Logischerwijs daalt de densiteit van de water-glycerol mengsel bij een stijgende temperatuur (Schmidt et al., 2018). Merk op dat de juiste dichtheid steeds moet ingevoerd worden in het meetconfiguratiemenu om de juiste viscositeit te bekomen.

Tabel 13 Dichtheid van de water-glycerol mengsels
Bron: Bewerkt van Cheng, 2008 en Volk & Kähler, 2018

| T [°C] | Densiteit [g/cm^3] | | | | |
|---------|------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Mengsel | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 |
| 0 | 1,0625 | 1,1235 | 1,1798 | 1,2299 | 1,2730 |
| 20 | 1,0569 | 1,1145 | 1,1683 | 1,2173 | 1,2608 |
| 40 | 1,0489 | 1,1045 | 1,1568 | 1,2051 | 1,2485 |

Verder verandert de oppervlaktespanning lineair met het glycerolgehalte. Bij een toevoeging van glycerol, verlaagt de oppervlaktespanning van het mengsel. De oppervlaktespanning daalt eveneens wanneer de temperatuur stijgt en het omgekeerde gebeurt bij een daling van de temperatuur. Ten slotte daalt de chemische potentiaal van water lineair bij een toevoeging van glycerol. Deze factoren hebben geen directe invloed op de viscositeitsmeting (Takamura et al., 2012).

De intentie van dit experiment was om de viscositeit van de mengsels te bepalen bij drie temperaturen, namelijk 0°C, 20°C en 40°C. Door het stukgaan van de viscosimeter werden enkel metingen uitgevoerd bij 20°C.

Met het oog op verder onderzoek, werden de drie temperaturen toch besproken. **Tabel 14** is een samenvatting van de vriespunten en kookpunten van de vijf mengsels. Opvallend is dat mengsel M5 een vriespunt toont bij 18°C. Er kunnen geen metingen plaatsvinden in M5 bij een temperatuur van 0°C.

Tabel 14 Vries- en kookpunten van water-glycerine oplossingen
Bron: Bewerkt van SDA, 1963 en Lane, 1925

| Mengsel | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Vriespunt [°C] | -4,8 | -15,4 | -34,7 | -20,3 | 18,0 |
| Kookpunt [°C] | 101,6 | 104,5 | 109,6 | 121,5 | 290,0 |

Tabel 15 is een voorstelling van de viscositeitswaarden die verwacht werden uit het experiment. Deze waarden verschillen naargelang de meetinstrumenten of meetmethode en zijn bijgevolg in elk onderzoek verschillend. Er moet ook telkens rekening gehouden worden met de foutmarge van de Haake Viscostester D (Ferreira et al., 2017).

Tabel 15 Theoretische viscositeit van water-glycerol mengsels
Bron: Bewerkt van Mixing High Viscosity Solutions with the Vitl Co-Mix Laboratory Mixer, 2015

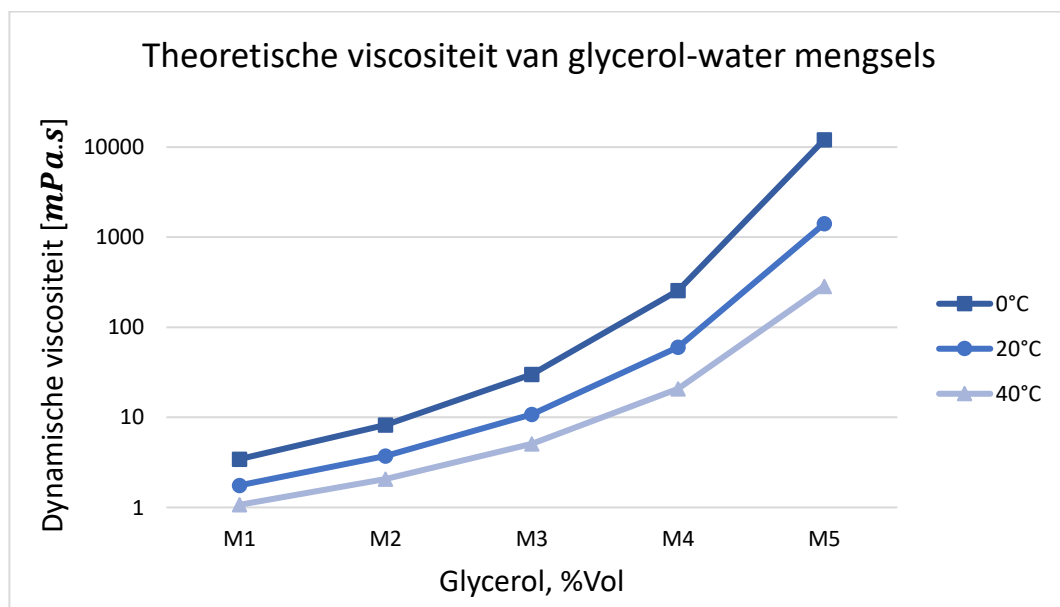
| T [°C] | Dynamische viscositeit [<i>mPa.s</i>] | | | | |
|---------|---|------|------|------|--------|
| Mengsel | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 |
| 0 | 3,44 | 8,25 | 29,9 | 255 | 12 070 |
| 20 | 1,76 | 3,72 | 10,8 | 60,1 | 1 410 |
| 40 | 1,07 | 2,07 | 5,08 | 20,8 | 284 |

De evolutie van de viscositeit in functie van de glycerolconcentratie is, in tegenstelling tot de dichtheid en de oppervlaktespanning, niet lineair. **Tabel 15** toont een onregelmatige stijging van de viscositeit wanneer de glycerolconcentratie hoger is. Deze stijging wordt versterkt naarmate het glycerolpercentage verhoogd (Michal et al., 2017). Omgekeerd kan het toevoegen van een kleine hoeveelheid water aan het mengsel, zorgen voor een grote daling in de viscositeit (Takamura et al., 2012).

Zoals reeds vermeld heeft de omgevingstemperatuur een sterke invloed op de viscositeit van een fluïdum. Een temperatuurstijging gaat doorgaans gepaard met een verlaging van de viscositeit. Het dalen van de viscositeit bij een temperatuurstijging kan te wijten zijn aan verminderde afschuifkrachten tussen de vloeistoflagen bij een hogere temperatuur (Chaitanya Lahari et al., 2019). Daartegenover zal een vloeistof een forse stijging tonen in viscositeit wanneer een fluïdum zijn vriespunt benadert (Gonzalez et al., 2011).

Een typerend kenmerk van glycerol is dan ook de dramatische stijging in viscositeit wanneer het de glasovergangstemperatuur nadert (Ferreira et al., 2017). Deze stijging wordt eveneens versterkt bij een hoger glycerolgehalte. Dit wordt bevestigd in **Tabel 15**, waar de verandering in viscositeit groter is bij een daling van de temperatuur dan bij een verhoging. Bij M1 is het verschil, veroorzaakt door een temperatuursverandering, relatief veel kleiner dan bij M5.

Figuur 43 illustreert de waarden vermeld in **Tabel 15** en verduidelijkt de hierboven getrokken conclusies. Bij een hoger glycerolgehalte zijn de waarden voor de drie temperaturen verder van elkaar verwijderd. De forse stijging in viscositeit bij een toeneming van de glycerolconcentratie is duidelijk te merken op de logaritmische schaal.

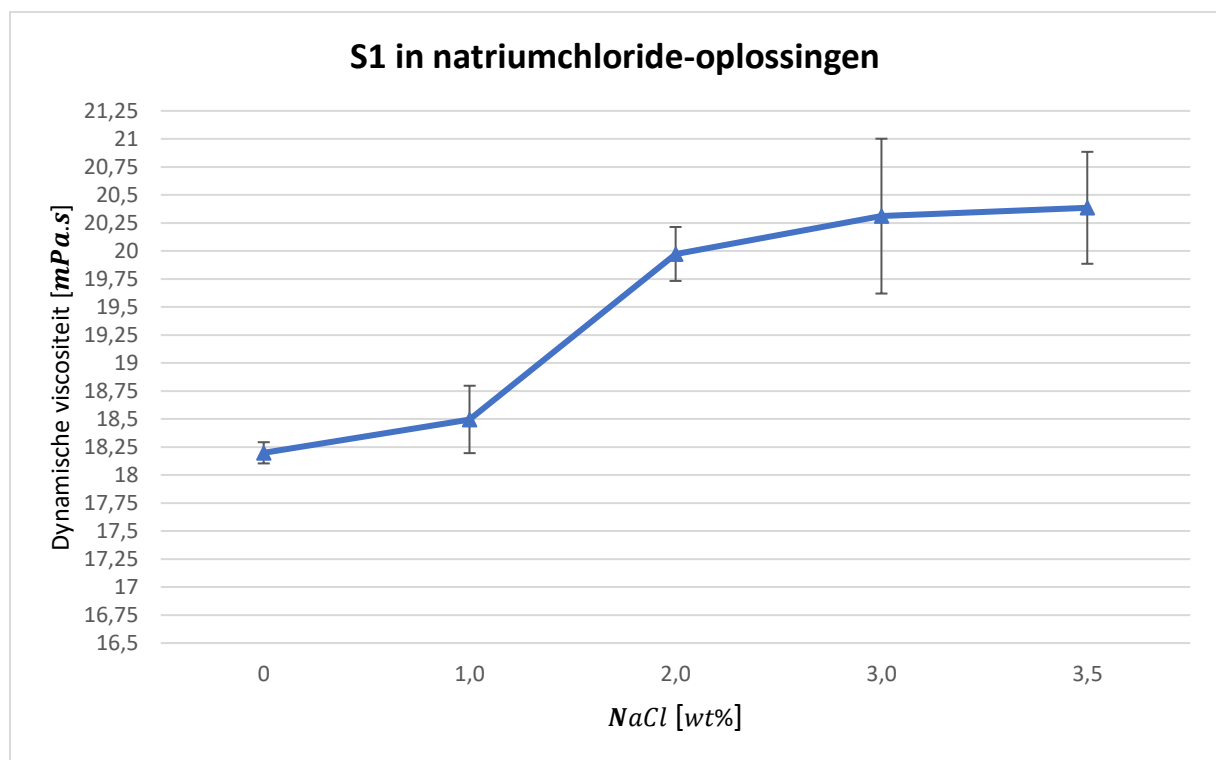


Figuur 43 Theoretische viscositeit van water-glycerol mengsels
Bron: Bewerkt van Tabel 15

4.2 Data en resultaten

4.2.1 S1 in de natriumchlorideoplossingen

De resultaten van het experiment zijn samengevat in **Tabel 16** en **Figuur 44**. **Figuur 44** wordt gemaakt op basis van de gemiddelde waarden van de metingen in **Tabel 16**. De gemiddelde dynamische viscositeit wordt berekend voor kraantjeswater en elke natriumchloride-oplossing en uitgezet op de y -as. Op de x -as staan de concentraties van het natriumchloride-oplossingen, beginnend bij 0 $wt\%$ en eindigend bij 3,5 $wt\%$.



Figuur 44 Viscositeit gemeten met spindel S1 in natriumchlorideoplossingen. Foutenvlaggen zijn berekend als standaardfout op een reeks van 5 metingen.
Bron: Eigen werk

In **Figuur 44** kan men zien dat de viscositeit stijgt bij een toenemende concentratie van natriumchloride. De grootste stijging gebeurt tussen de oplossingen met 1,0 $wt\%$ NaCl en 2,0 $wt\%$ NaCl. Tussen 1,0 $wt\%$ en 2,0 $wt\%$ neemt de viscositeit toe met 67,5% van de totale toename. Tussen 0 $wt\%$ en 1,0 $wt\%$ is er een toename van 13,6% en tussen 2,0 $wt\%$ en 3,0 $wt\%$ is dit 15,4%. Tussen 3,0 $wt\%$ en 3,5 $wt\%$ is er maar een kleine stijging van 3,4%. Dit is deels te wijten aan de dichtheid die maar met de helft vergroot. Merk op dat de viscositeit niet lineair stijgt zoals de dichtheid.

Tabel 16 Viscositeitsmetingen natriumchloride oplossingen

Bron: Eigen werk

| RPM | Meting | Kinematische Viscositeit [<i>cSt</i>] | Dynamische Viscositeit [<i>mPa.s</i>] | Temperatuur [<i>°C</i>] | Max [<i>mPa.s</i>] | % | Densiteit [<i>g/cm³</i>] | TTS [<i>''</i>] | Tijd tussen metingen [<i>''</i>] |
|--|------------|---|---|---------------------------|----------------------|------|---------------------------------------|-------------------|------------------------------------|
| Blanke cilinder (S1): Kraantjeswater | | | | | | | | | |
| 200 | V(R/1/200) | 18,10 | 18,10 | 20,6 | | 36,2 | 1,000 | 3 | 3 |
| 200 | V(R/1/200) | 18,06 | 18,06 | 20,6 | | 36,1 | 1,000 | 3 | 3 |
| 200 | V(R/1/200) | 18,04 | 18,04 | 20,6 | | 36,8 | 1,000 | 3 | 3 |
| 200 | V(R/1/200) | 18,24 | 18,24 | 20,6 | | 36,5 | 1,000 | 3 | 3 |
| 200 | V(R/1/200) | 18,55 | 18,55 | 20,6 | | 37,1 | 1,000 | 3 | 3 |
| Blanke cilinder (S1): Kraantjeswater + 10g zout | | | | | | | | | |
| 200 | V(R/1/200) | 18,77 | 18,87 | 20,6 | | 37,7 | 1,0051 | 3 | 3 |
| 200 | V(R/1/200) | 19,32 | 19,42 | 20,6 | | 38,9 | 1,0051 | 3 | 3 |
| 200 | V(R/1/200) | 17,56 | 17,65 | 20,6 | | 35,2 | 1,0051 | 3 | 3 |
| 200 | V(R/1/200) | 18,07 | 18,16 | 20,6 | | 36,1 | 1,0051 | 3 | 3 |
| 200 | V(R/1/200) | 18,29 | 18,38 | 20,6 | | 37,2 | 1,0051 | 3 | 3 |
| Blanke cilinder (S1): Kraantjeswater + 20g zout | | | | | | | | | |
| 200 | V(R/1/200) | 19,10 | 19,33 | 20,6 | | 38,8 | 1,0122 | 3 | 3 |
| 200 | V(R/1/200) | 20,27 | 20,52 | 20,7 | | 41,0 | 1,0122 | 3 | 3 |

| | | | | | | | | |
|------------|------------|-------|-------|------|------|--------|---|---|
| 200 | V(R/1/200) | 19,34 | 19,58 | 20,7 | 39,4 | 1,0122 | 3 | 3 |
| 200 | V(R/1/200) | 19,66 | 19,90 | 20,7 | 39,9 | 1,0122 | 3 | 3 |
| 200 | V(R/1/200) | 20,29 | 20,54 | 20,7 | 40,7 | 1,0122 | 3 | 3 |

Blanke cilinder (S1): Kraantjeswater + 30g zout

| | | | | | | | | |
|------------|------------|-------|-------|------|------|--------|---|---|
| 200 | V(R/1/200) | 20,15 | 20,54 | 20,6 | 41,8 | 1,0194 | 3 | 3 |
| 200 | V(R/1/200) | 22,37 | 22,80 | 20,7 | 45,1 | 1,0194 | 3 | 3 |
| 200 | V(R/1/200) | 19,74 | 20,12 | 20,7 | 40,0 | 1,0194 | 3 | 3 |
| 200 | V(R/1/200) | 18,24 | 18,59 | 20,7 | 37,2 | 1,0194 | 3 | 3 |
| 200 | V(R/1/200) | 19,12 | 19,49 | 20,7 | 38,9 | 1,0194 | 3 | 3 |

Blanke cilinder (S1): Kraantjeswater + 35g zout

| | | | | | | | | |
|------------|------------|-------|-------|------|------|--------|---|---|
| 200 | V(R/1/200) | 19,71 | 19,76 | 20,7 | 40,8 | 1,0023 | 3 | 3 |
| 200 | V(R/1/200) | 21,04 | 21,09 | 20,7 | 43,0 | 1,0023 | 3 | 3 |
| 200 | V(R/1/200) | 21,94 | 21,99 | 20,7 | 45,0 | 1,0023 | 3 | 3 |
| 200 | V(R/1/200) | 19,24 | 19,28 | 20,7 | 39,5 | 1,0023 | 3 | 3 |
| 200 | V(R/1/200) | 19,76 | 19,81 | 20,7 | 40,4 | 1,0023 | 3 | 3 |

De viscositeit van de natriumchloride-oplossingen vallen buiten het meetbereik van de HAAKE viscotester D. De bekomen waarden stellen bijgevolg geen realistische waarden voor, maar de metingen kunnen wel worden gebruikt om de verschillende oplossingen met elkaar te vergelijken. In **Tabel 17** wordt de gemeten viscositeit vergeleken met de theoretische viscositeit, zodat de fout op de viscosimeter geschat kan worden. Aangezien de viscositeitswaarde telkens buiten het meetbereik van het toestel viel, is dit niet verder onderzocht geweest met S2 en S3, noch met andere temperaturen.

Tabel 17 Gemiddelde viscositeitwaarden S1 in natriumchloride-oplossingen
Bron: Bewerkt van **Tabel 10**

| Natriumchloride concentratie [wt%] | Gemiddelde kinematische Viscositeit [cSt] | Gemiddelde dynamische Viscositeit [mPa.s] | Theoretische viscositeit [mPa.s] |
|---|--|--|---|
| <i>0 wt% NaCl</i> | 18,198 | 18,198 | 1,00 |
| <i>1,0 wt% NaCl</i> | 18,402 | 18,496 | 1,02 |
| <i>2,0 wt% NaCl</i> | 19,732 | 19,973 | - |
| <i>3,0 wt% NaCl</i> | 19,924 | 20,311 | - |
| <i>3,5 wt% NaCl</i> | 20,338 | 20,385 | 1,07 |

4.2.2 S1, S2 en S3 in waterige glycerine oplossingen

De bekomen viscositeitswaarden worden voorgesteld in **Tabel 18**, **Tabel 19**, **Tabel 20**, **Tabel 21** en **Tabel 22**. Om de data grondiger te analyseren, worden eveneens grafieken opgesteld: **Figuur 45**, **Figuur 46**, **Figuur 47**, **Figuur 48** en **Figuur 49**. Op de y-as wordt de dynamische viscositeit uitgezet in *mPa.s* en op de x-as staat het Reynoldsgetal. In deze grafieken staan de foutbalken gelijk aan de foutmarge van de rotatieviscosimeter, die $\pm 1\%$ van de basisschaal bedraagt. De foutmarge wordt apart berekend voor elke meting. Bij de glyceroloplossing M5 zijn de foutbalken zo klein, dat men ze moeilijk kan waarnemen op de grafiek in **Figuur 49**.

Tabel 18 Viscositeitsmetingen in glyceroloplossing M1

Bron: Eigen werk

| Tijd | Meting | Kinematische Viscositeit [cSt] | Dynamische Viscositeit [mPa. s] | Temperatuur [°C] | Max [mPa. s] | % | Densiteit [g/cm ³] | TTS ['] | Tijd tussen metingen ['] |
|---------------------------------------|------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------|--------------|------|--------------------------------|---------|--------------------------|
| Blanke cilinder (C1) | | | | | | | | | |
| 00:00 | V(R/1/200) | 27,47 | 28,74 | 21,4 | 95,6 | 57,4 | 1,046 | 3 | 3 |
| 00:03 | V(R/1/200) | 28,76 | 30,09 | 21,4 | 95,6 | 60,5 | 1,046 | 3 | 3 |
| 00:06 | V(R/1/200) | 27,06 | 28,31 | 21,4 | 95,6 | 56,7 | 1,046 | 3 | 3 |
| 00:09 | V(R/1/200) | 25,24 | 26,41 | 21,4 | 95,6 | 52,7 | 1,046 | 3 | 3 |
| 00:12 | V(R/1/200) | 25,42 | 26,59 | 21,4 | 95,6 | 53,2 | 1,046 | 3 | 3 |
| Cilinder met verf (C2) | | | | | | | | | |
| 00:00 | V(R/1/200) | 24,28 | 25,40 | 21,4 | 95,6 | 51,2 | 1,046 | 3 | 3 |
| 00:03 | V(R/1/200) | 25,96 | 27,16 | 21,4 | 95,6 | 54,8 | 1,046 | 3 | 3 |
| 00:06 | V(R/1/200) | 25,37 | 26,54 | 21,2 | 95,6 | 53,0 | 1,046 | 3 | 3 |
| 00:09 | V(R/1/200) | 25,40 | 26,57 | 21,2 | 95,6 | 53,1 | 1,046 | 3 | 3 |
| 00:12 | V(R/1/200) | 25,77 | 26,96 | 21,2 | 95,6 | 54,0 | 1,046 | 3 | 3 |
| Cilinder met verf en grit (C3) | | | | | | | | | |
| 00:00 | V(R/1/200) | 35,11 | 36,73 | 21,2 | 95,6 | 73,5 | 1,046 | 3 | 3 |
| 00:03 | V(R/1/200) | 33,78 | 35,34 | 21,2 | 95,6 | 70,7 | 1,046 | 3 | 3 |
| 00:06 | V(R/1/200) | 34,12 | 35,70 | 21,2 | 95,6 | 71,3 | 1,046 | 3 | 3 |
| 00:09 | V(R/1/200) | 33,76 | 35,32 | 21,2 | 95,6 | 70,6 | 1,046 | 3 | 3 |
| 00:12 | V(R/1/200) | 33,75 | 35,31 | 21,2 | 95,6 | 70,7 | 1,046 | 3 | 3 |

Tabel 19 Viscositeitsmetingen in glyceroloplossing M2

Bron: Eigen werk

| Tijd | Meting | Kinematische Viscositeit [<i>cSt</i>] | Dynamische Viscositeit [<i>mPa. s</i>] | Temperatuur [<i>°C</i>] | Max [<i>mPa. s</i>] | % | Densiteit [<i>g/cm³</i>] | TTS ['] | Tijd tussen metingen ['] |
|---------------------------------------|------------|---|--|---------------------------|-----------------------|------|---------------------------------------|---------|--------------------------|
| Blanke cilinder (C1) | | | | | | | | | |
| 00:00 | V(R/1/200) | 30,79 | 33,81 | 21,2 | 45,5 | 67,2 | 1,098 | 3 | 3 |
| 00:03 | V(R/1/200) | 31,21 | 34,27 | 21,2 | 45,5 | 69,2 | 1,098 | 3 | 3 |
| 00:06 | V(R/1/200) | 32,60 | 35,79 | 21,2 | 45,5 | 71,5 | 1,098 | 3 | 3 |
| 00:09 | V(R/1/200) | 33,14 | 36,39 | 21,2 | 45,5 | 72,8 | 1,098 | 3 | 3 |
| 00:12 | V(R/1/200) | 31,71 | 34,82 | 21,2 | 45,5 | 69,6 | 1,098 | 3 | 3 |
| Cilinder met verf (C2) | | | | | | | | | |
| 00:00 | V(R/1/200) | 31,84 | 34,96 | 21,2 | 45,5 | 70,6 | 1,098 | 3 | 3 |
| 00:03 | V(R/1/200) | 33,12 | 36,37 | 21,2 | 45,5 | 72,6 | 1,098 | 3 | 3 |
| 00:06 | V(R/1/200) | 32,61 | 35,81 | 21,2 | 45,5 | 71,4 | 1,098 | 3 | 3 |
| 00:09 | V(R/1/200) | 34,47 | 37,85 | 21,2 | 45,5 | 75,7 | 1,098 | 3 | 3 |
| 00:12 | V(R/1/200) | 35,55 | 39,03 | 21,2 | 45,5 | 78,1 | 1,098 | 3 | 3 |
| Cilinder met verf en grit (C3) | | | | | | | | | |
| 00:00 | V(R/1/200) | 36,38 | 39,95 | 21,2 | 45,5 | 79,7 | 1,098 | 3 | 3 |
| 00:03 | V(R/1/200) | 36,52 | 40,10 | 21,2 | 45,5 | 80,4 | 1,098 | 3 | 3 |
| 00:06 | V(R/1/200) | 36,70 | 40,30 | 21,2 | 45,5 | 80,6 | 1,098 | 3 | 3 |
| 00:09 | V(R/1/200) | 36,70 | 40,30 | 21,2 | 45,5 | 80,8 | 1,098 | 3 | 3 |
| 00:12 | V(R/1/200) | 37,33 | 40,99 | 21,2 | 45,5 | 82,0 | 1,098 | 3 | 3 |

Tabel 20 Viscositeitsmetingen in glyceroloplossing M3

Bron: Eigen werk

| Tijd | Meting | Kinematische Viscositeit [cSt] | Dynamische Viscositeit [mPa. s] | Temperatuur [°C] | Max [mPa. s] | % | Densiteit [g/cm ³] | TTS ['] | Tijd tussen metingen ['] |
|---------------------------------------|------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------|--------------|------|--------------------------------|---------|--------------------------|
| Blanke cilinder (C1) | | | | | | | | | |
| 00:00 | V(R/1/100) | 39,64 | 45,67 | 21,2 | 86,6 | 43,5 | 1,152 | 3 | 3 |
| 00:03 | V(R/1/100) | 39,80 | 45,85 | 21,2 | 86,6 | 43,7 | 1,152 | 3 | 3 |
| 00:06 | V(R/1/100) | 39,94 | 46,01 | 21,2 | 86,6 | 43,9 | 1,152 | 3 | 3 |
| 00:09 | V(R/1/100) | 38,21 | 44,02 | 21,2 | 86,6 | 44,0 | 1,152 | 3 | 3 |
| 00:12 | V(R/1/100) | 38,37 | 44,21 | 21,2 | 86,6 | 44,2 | 1,152 | 3 | 3 |
| Cilinder met verf (C2) | | | | | | | | | |
| 00:00 | V(R/1/100) | 39,63 | 45,66 | 21,2 | 86,6 | 45,7 | 1,152 | 3 | 3 |
| 00:03 | V(R/1/100) | 39,70 | 45,74 | 21,2 | 86,6 | 45,7 | 1,152 | 3 | 3 |
| 00:06 | V(R/1/100) | 40,08 | 46,18 | 21,2 | 86,6 | 46,1 | 1,152 | 3 | 3 |
| 00:09 | V(R/1/100) | 40,28 | 46,41 | 21,2 | 86,6 | 46,4 | 1,152 | 3 | 3 |
| 00:12 | V(R/1/100) | 40,05 | 46,14 | 21,1 | 86,6 | 46,1 | 1,152 | 3 | 3 |
| Cilinder met verf en grit (C3) | | | | | | | | | |
| 00:00 | V(R/1/100) | 41,61 | 47,94 | 21,1 | 86,6 | 48,0 | 1,152 | 3 | 3 |
| 00:03 | V(R/1/100) | 41,69 | 48,03 | 21,1 | 86,6 | 48,0 | 1,152 | 3 | 3 |
| 00:06 | V(R/1/100) | 41,77 | 48,12 | 21,1 | 86,6 | 48,1 | 1,152 | 3 | 3 |
| 00:09 | V(R/1/100) | 41,86 | 48,23 | 21,1 | 86,6 | 48,2 | 1,152 | 3 | 3 |
| 00:12 | V(R/1/100) | 41,91 | 48,28 | 21,1 | 86,6 | 48,3 | 1,152 | 3 | 3 |

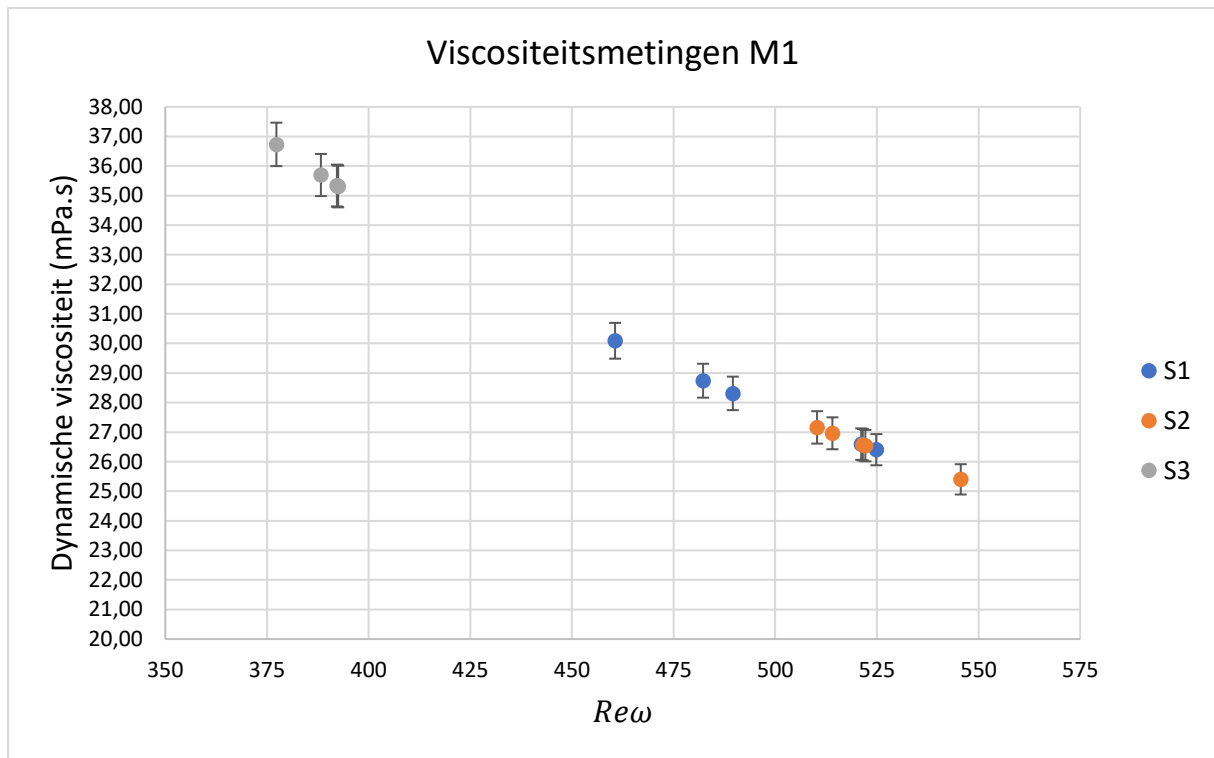
Tabel 21 Viscositeitsmetingen in glyceroplossing M4
Bron: Eigen werk

| Tijd | Meting | Kinematische Viscositeit [cSt] | Dynamische Viscositeit [mPa. s] | Temperatuur [°C] | Max [mPa. s] | % | Densiteit [g/cm ³] | TTS ['] | Tijd tussen metingen ['] |
|---------------------------------------|-----------|--------------------------------|---------------------------------|------------------|--------------|------|--------------------------------|---------|--------------------------|
| Blanke cilinder (C1) | | | | | | | | | |
| 00:00 | V(R/1/60) | 83,26 | 110,62 | 20,3 | 82,75 | 60,5 | 1,209 | 3 | 3 |
| 00:03 | V(R/1/60) | 83,14 | 100,47 | 20,3 | 82,75 | 60,2 | 1,209 | 3 | 3 |
| 00:06 | V(R/1/60) | 82,95 | 100,25 | 20,3 | 82,75 | 60,1 | 1,209 | 3 | 3 |
| 00:09 | V(R/1/60) | 82,85 | 100,12 | 20,3 | 82,75 | 60,1 | 1,209 | 3 | 3 |
| 00:12 | V(R/1/60) | 82,80 | 100,06 | 20,3 | 82,75 | 60,0 | 1,209 | 3 | 3 |
| Cilinder met verf (C2) | | | | | | | | | |
| 00:00 | V(R/1/60) | 84,66 | 102,31 | 20,4 | 82,75 | 61,4 | 1,209 | 3 | 3 |
| 00:03 | V(R/1/60) | 84,64 | 102,29 | 20,4 | 82,75 | 61,4 | 1,209 | 3 | 3 |
| 00:06 | V(R/1/60) | 84,69 | 102,35 | 20,4 | 82,75 | 61,3 | 1,209 | 3 | 3 |
| 00:09 | V(R/1/60) | 84,41 | 102,01 | 20,4 | 82,75 | 61,2 | 1,209 | 3 | 3 |
| 00:12 | V(R/1/60) | 84,27 | 101,84 | 20,4 | 82,75 | 61,1 | 1,209 | 3 | 3 |
| Cilinder met verf en grit (C3) | | | | | | | | | |
| 00:00 | V(R/1/60) | 87,11 | 105,27 | 20,5 | 82,75 | 63,1 | 1,209 | 3 | 3 |
| 00:03 | V(R/1/60) | 87,09 | 105,25 | 20,5 | 82,75 | 63,1 | 1,209 | 3 | 3 |
| 00:06 | V(R/1/60) | 87,13 | 105,30 | 20,5 | 82,75 | 63,0 | 1,209 | 3 | 3 |
| 00:09 | V(R/1/60) | 87,06 | 105,21 | 20,5 | 82,75 | 63,0 | 1,209 | 3 | 3 |
| 00:12 | V(R/1/60) | 86,92 | 105,04 | 20,5 | 82,75 | 59,9 | 1,209 | 3 | 3 |

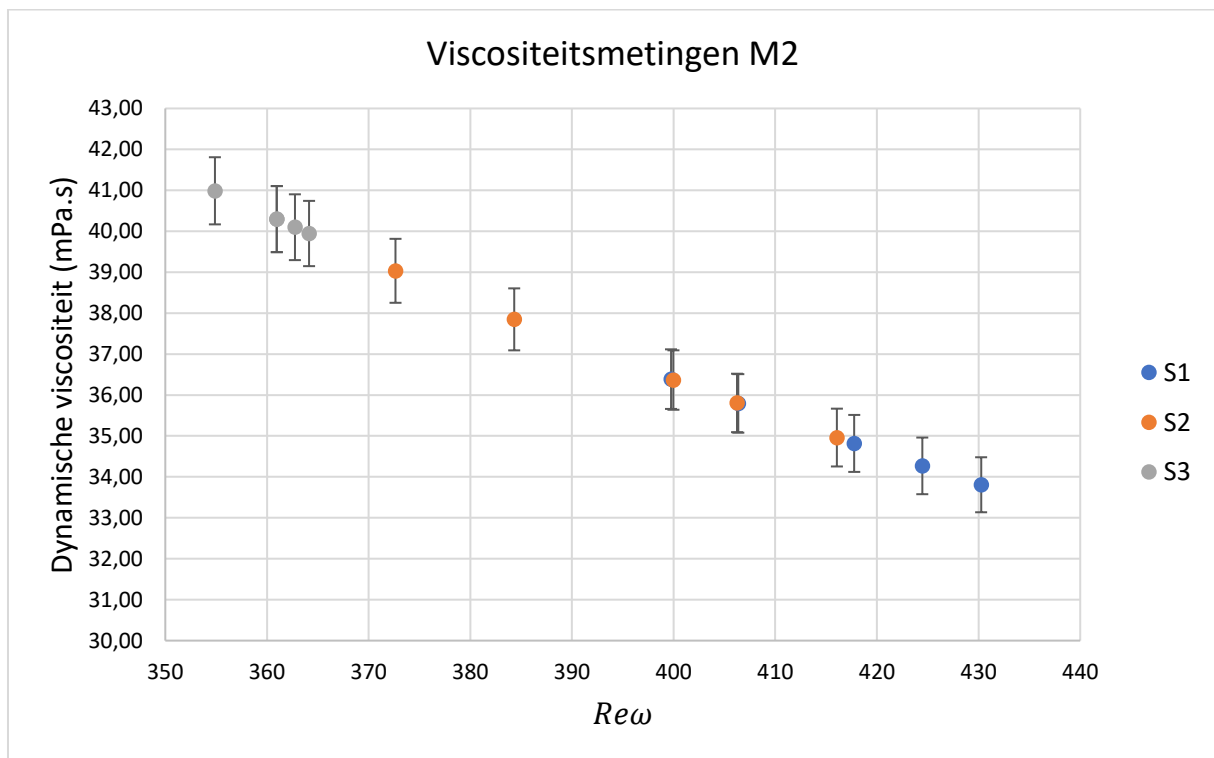
Tabel 22 Viscositeitsmetingen in glyceroloplossing M5

Bron: Eigen werk

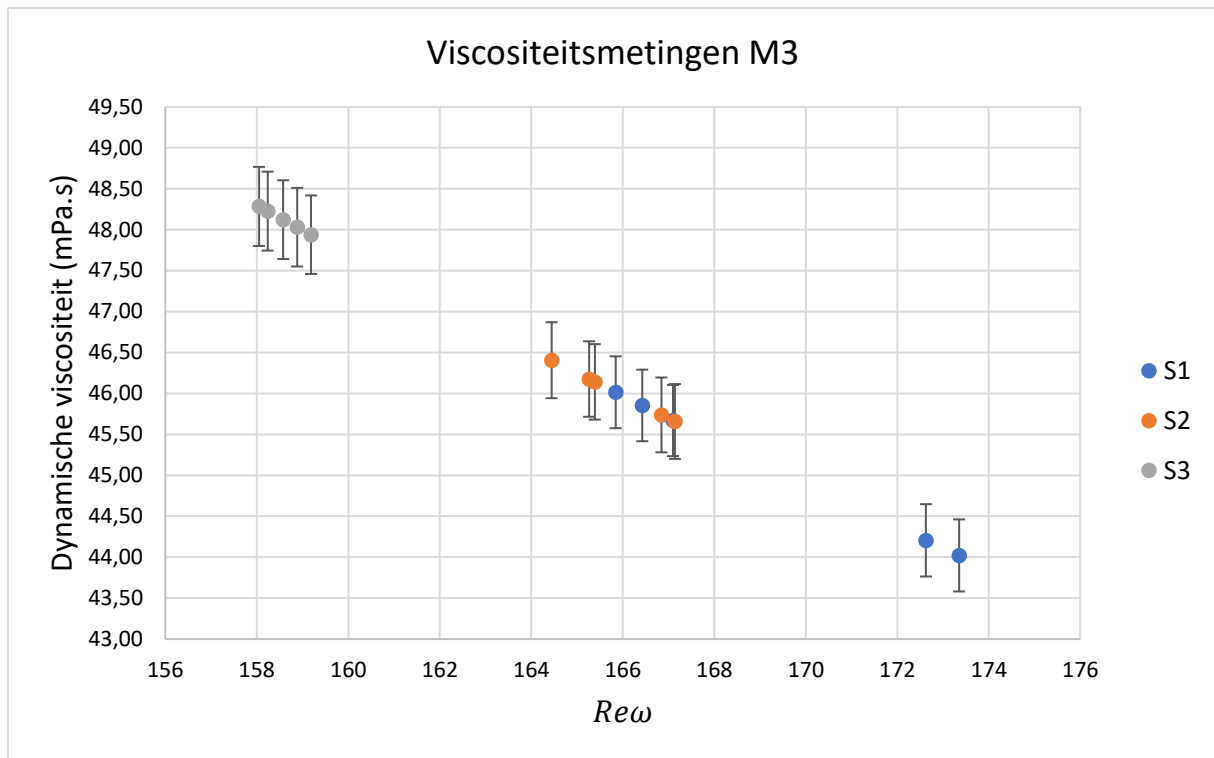
| Tijd | Meting | Kinematische Viscositeit [cSt] | Dynamische Viscositeit [mPa. s] | Temperatuur [°C] | Max [mPa. s] | % | Densiteit [g/cm ³] | TTS ['] | Tijd tussen metingen ['] |
|---------------------------------------|----------|--------------------------------|---------------------------------|------------------|--------------|------|--------------------------------|---------|--------------------------|
| Blanke cilinder (C1) | | | | | | | | | |
| 00:00 | V(R/1/5) | 939,9 | 1184,27 | 20,5 | 95,6 | 59,8 | 1,260 | 3 | 3 |
| 00:03 | V(R/1/5) | 939,3 | 1183,52 | 20,5 | 95,6 | 59,2 | 1,260 | 3 | 3 |
| 00:06 | V(R/1/5) | 937,0 | 1180,62 | 20,5 | 95,6 | 59,0 | 1,260 | 3 | 3 |
| 00:09 | V(R/1/5) | 934,8 | 1177,85 | 20,5 | 95,6 | 58,9 | 1,260 | 3 | 3 |
| 00:12 | V(R/1/5) | 933,0 | 1175,58 | 20,5 | 95,6 | 58,8 | 1,260 | 3 | 3 |
| Cilinder met verf (C2) | | | | | | | | | |
| 00:00 | V(R/1/5) | 910,1 | 1146,73 | 20,6 | 95,6 | 57,3 | 1,260 | 3 | 3 |
| 00:03 | V(R/1/5) | 918,6 | 1157,44 | 20,6 | 95,6 | 57,9 | 1,260 | 3 | 3 |
| 00:06 | V(R/1/5) | 921,9 | 1161,59 | 20,6 | 95,6 | 58,1 | 1,260 | 3 | 3 |
| 00:09 | V(R/1/5) | 923,3 | 1163,36 | 20,6 | 95,6 | 58,2 | 1,260 | 3 | 3 |
| 00:12 | V(R/1/5) | 924,4 | 1164,74 | 20,6 | 95,6 | 58,2 | 1,260 | 3 | 3 |
| Cilinder met verf en grit (C3) | | | | | | | | | |
| 00:00 | V(R/1/5) | 956,8 | 1205,57 | 20,7 | 95,6 | 60,3 | 1,260 | 3 | 3 |
| 00:03 | V(R/1/5) | 956,8 | 1205,57 | 20,7 | 95,6 | 60,3 | 1,260 | 3 | 3 |
| 00:06 | V(R/1/5) | 956,9 | 1206,69 | 20,7 | 95,6 | 60,3 | 1,260 | 3 | 3 |
| 00:09 | V(R/1/5) | 956,0 | 1204,56 | 20,7 | 95,6 | 60,2 | 1,260 | 3 | 3 |
| 00:12 | V(R/1/5) | 955,6 | 1204,06 | 20,7 | 95,6 | 60,2 | 1,260 | 3 | 3 |



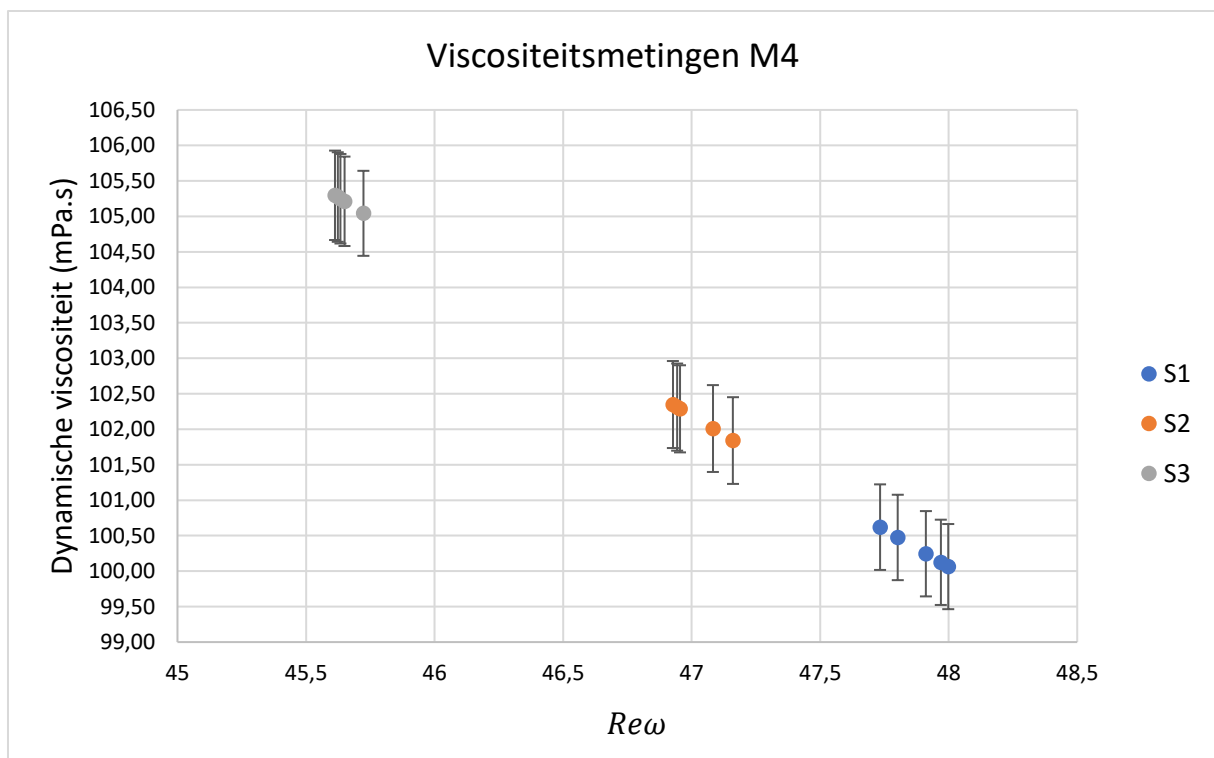
Figuur 45 Dynamische viscositeit in functie van Re voor glyceroloplossing M1. Foutvlaggen stellen de foutmarge van de rotatieviscosimeter voor.
Bron: Eigen werk



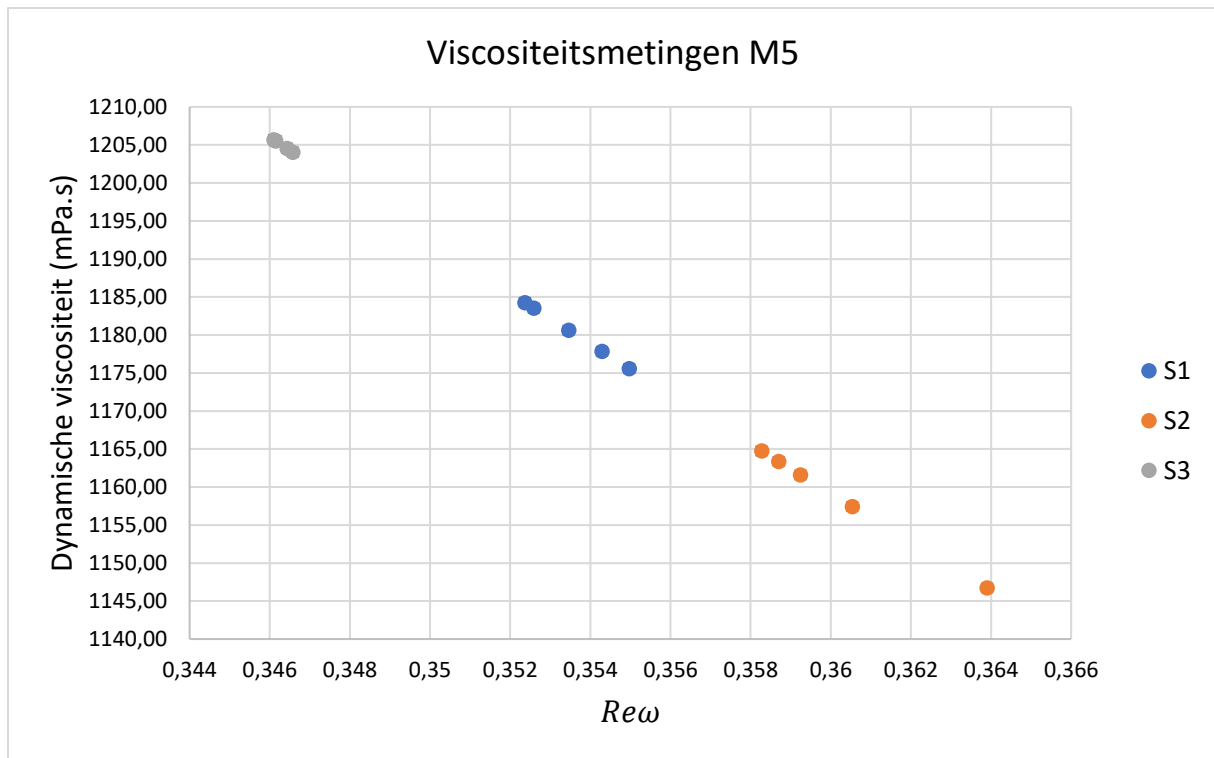
Figuur 46 Dynamische viscositeit in functie van Re voor glyceroloplossing M2. Foutvlaggen stellen de foutmarge van de rotatieviscosimeter voor.
Bron: Eigen werk



Figuur 47 Dynamische viscositeit in functie van Re voor glyceroloplossing M3. Foutvlaggen stellen de foutmarge van de rotatieviscosimeter voor.
Bron: Eigen werk



Figuur 48 Dynamische viscositeit in functie van Re voor glyceroloplossing M4. Foutvlaggen stellen de foutmarge van de rotatieviscosimeter voor.
Bron: Eigen werk



Figuur 49 Dynamische viscositeit in functie van Re voor glyceroloplossing M5. Foutvlaggen stellen de foutmarge van de rotatieviscosimeter voor.
Bron: Eigen werk

Het Reynoldsgetal Re_ω wordt met vergelijking (13) berekend. Dit stelt het Reynoldsgetal voor bij fluïda die zich in een roterende beweging bevinden.

$$Re_\omega = \frac{\omega \cdot R^2}{\nu} \quad (13)$$

Waarbij:

Re_ω Reynoldsgetal in functie van een roterend fluïdum

ω Hoeksnelheid [rad/s]

R Straal van de spindel [m]

ν Kinematische viscositeit van de vloeistof [m^2/s] (4)

In bovenstaande tabellen ziet men dat het percentage van de basisschaal stijgt met de ruwheid van de spindels. Het percentage van de basisschaal is afhankelijk van de combinatie spindel-rotatiesnelheid. Ook de viscositeitsmetingen stijgen met de ruwheid van de spindels zoals verwacht. Wat nog opvalt in bovenstaande grafieken is dat S3 gepaard gaat met lagere Reynoldsgetallen.

Men zou verwachten dat dit ruwere oppervlak gepaard gaat met een hogere Reynoldsgetal. Dit komt doordat de waarde van de kinematische viscositeit hoger is, waardoor het Reynoldsgetal lager is (Vergelijking (13)). De dynamische viscositeit van *S3* ligt beduidend hoger dan de waarden van *S1* en *S2*. Tussen *S1* en *S2* kan er geen duidelijke onderscheiding worden gemaakt. Bij *M2* en *M4* zijn de waarden van *S2* duidelijk groter dan de waarden van *S1*. Tussen *M1* en *M3* is er geen duidelijk onderscheid en bij *M5* zijn de waarden van *S2* dan weer lager dan de waarden van *S1*.

Er werd een t-toets uitgevoerd om na te gaan of de spindels als drie verschillende cilinders kunnen worden beschouwd. Een t-test wordt gebruikt om te kijken of twee groepen gelijk kunnen worden gesteld aan elkaar. De t-toets gebeurde tussen *S1* en *S2*, *S1* en *S3* en *S2* en *S3*. In een t-toets worden twee hypothesen verondersteld, met name de nulhypothese en de alternatieve hypothese. Bij de nulhypothese wordt verondersteld dat de gemiddelden van de twee doelgroepen gelijk zijn. De alternatieve hypothese toont aan dat de gemiddelden verschillen tussen de twee groepen.

Tabel 23 toont de kritische waarden van de t-test aan. Om te weten of men de nulhypothese mag verwerpen, werden de bekomen t-waarde vergeleken met de kritische t-waarden. Deze waarden werden berekend in Microsoft Excel met acht vrijheidsgraden en vier significantieniveaus (*P*), namelijk 0,05, 0,01, 0,005 en 0001. Het betrouwbaarheidsinterval wordt bepaald door het significantieniveau af te trekken van één (Turney, 2022).

Tabel 23 T-waarde voor water-glycerine oplossingen
Bron: Eigen werk

| BETROUWBAARHEIDS -INTERVAL | P | SYMBOOL | T-WAARDE |
|-------------------------------|-------|---------|----------|
| 95,0% | 0,05 | * | 2,306 |
| 99,0% | 0,01 | ** | 3,355 |
| 99,5% | 0,005 | *** | 3,833 |
| 99,9% | 0,001 | **** | 5,041 |

Tabel 24 toont de bekomen t-waarden en het significantieniveau dat van toepassing is. In **Tabel 24** kan men zien dat het verschil tussen *S1* en *S2* klein is, met een uitzondering bij *M4*. Tussen *S1* en *S3* zijn er grotere verschillen, maar de grootste t-waarden bevinden zich tussen *S2* en *S3*. Merk op dat er voor alle spindels een piek is in de t-waarden bij *M4*.

Tabel 24 T-toets voor water-glycerine oplossingen
Bron: Eigen werk

| T-WAARDEN | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 |
|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| S1 vs. S2 | 2,155 | 1,836 | 1,868 | 15,936**** | 6,938**** |
| S1 vs. S3 | 10,314**** | 10,430**** | 6,849**** | 42,807**** | 14,683**** |
| S2 vs. S3 | 23,478**** | 8,108**** | 14,004**** | 39,607**** | 16,441**** |

Door de waarden van **Tabel 23** en **Tabel 24** te vergelijken kan er besloten worden dat:

- Het verschil tussen *S1* en *S2* is significant bij *M4* ($t(8) = 15,936$; $p < 0,001$) en *M5* ($t(8) = 6,938$; $p < 0,001$)
- De nulhypothese tussen *S1* en *S2* geldt wel voor *M1*, *M2* en *M3*
- Het verschil tussen *S1* en *S3* is significant voor alle water-glycerine mengsels: *M1* ($t(8) = 10,314$; $p < 0,001$), *M2* ($t(8) = 10,430$; $p < 0,001$), *M3* ($t(8) = 6,849$; $p < 0,001$), *M4* ($t(8) = 42,807$; $p < 0,001$), *M5* ($t(8) = 14,683$; $p < 0,001$)
- Het verschil tussen *S2* en *S3* is significant voor alle water-glycerine mengsels: *M1* ($t(8) = 23,478$; $p < 0,001$), *M2* ($t(8) = 8,108$; $p < 0,001$), *M3* ($t(8) = 14,004$; $p < 0,001$), *M4* ($t(8) = 39,607$; $p < 0,001$), *M5* ($t(8) = 16,441$; $p < 0,001$)

De reden dat er eerder geen duidelijke onderscheiding kon gemaakt worden tussen *S1* en *S2*, is omdat de nulhypothese wel geldt voor *M1*, *M2* en *M3*. In deze gevallen lijken de viscositeitswaarden te veel op elkaar om conclusies te trekken. Voor *M4* en *M5* werd de nulhypothese verworpen, maar toch kan er geen duidelijke trend worden onderscheden. Dit is te wijten aan de ruwheidsprofielen van de twee spindels.

Tabel 25 stelt de gemiddelde kinematische viscositeit en dynamische viscositeit voor in functie van de vijf mengsels en de drie spindels.

Tabel 25 Viscositeitwaarden S1, S2 en S3 in waterige glycerine oplossingen
Bron: Bewerkt van **Tabel 15**

| Mengsel | Gemiddelde kinematische Viscositeit [<i>cSt</i>] | | |
|-----------|--|---------|---------|
| | Spindel | | |
| | S1 | S2 | S3 |
| M1 | 26,790 | 25,865 | 34,104 |
| M2 | 31,890 | 34,355 | 36,925 |
| M3 | 39,192 | 39,948 | 41,768 |
| M4 | 83,000 | 84,455 | 87,062 |
| M5 | 936,800 | 921,500 | 956,420 |

| | Gemiddelde dynamische Viscositeit [<i>mPa. s</i>] | | | Theoretische viscositeit [<i>mPa. s</i>] |
|-----------|---|----------|----------|--|
| | S1 | S2 | S3 | |
| M1 | 28,030 | 26,530 | 35,680 | 1,760 |
| M2 | 34,040 | 37,700 | 40,540 | 3,720 |
| M3 | 45,150 | 46,020 | 48,120 | 10,800 |
| M4 | 100,310 | 102,160 | 105,210 | 60,100 |
| M5 | 1180,370 | 1158,770 | 1205,090 | 1410,000 |

De rotatieviscosimeter meet de kinematische viscositeit, waaruit de dynamische viscositeit wordt berekend door deze waarde te vermenigvuldigen met de densiteit van het medium (Vergelijking (4)). Per spindel en mengsel werd het gemiddelde genomen van de vijf metingen. Voor de dynamische viscositeit worden eveneens de theoretische waarden voorgesteld, die eerder werden berekend in **Tabel 15**.

De theoretische viscositeitswaarden werden met de dynamische viscositeit van S1 vergeleken. M1, M2 en M3 vielen buiten het meetbereik van de HAAKE viscotester D. Dit verklaart waarom de viscositeitwaarden van M1, M2 en M3 ver van de theoretische dynamische viscositeit afwijken. M4 en M5 vielen echter wel in het meetbereik, maar er is geen verklaring gevonden voor de afwijkende waarden.

5 Discussie

Om meer te weten te komen over de invloed van de ruwheid op de wrijvingsweerstand, werd er gekeken naar de torsie. De coëfficiënt van de torsie C_m werd uitgezet in functie van het Reynoldsgetal, in de poging een verband te vinden tussen de weerstand en de oppervlakteruwheid. De inspiratie voor deze vergelijking werd gehaald uit een onderzoek van Schults en Myers, eerder beschreven in het onderdeel 1.3.1 (Schultz & Myers, 2003). De coëfficiënt van de torsie werd berekend met vergelijking (14). Deze vergelijking is gebaseerd op de wet van Stokes en de wet van Hagen-Poiseuille.

$$C_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot \eta}{\omega \cdot R^2} \quad (14)$$

Waarbij:

- η Dynamische viscositeit [*Pa.s*] (1)
- R Straal van de spindel [*m*]
- ω Hoeksnelheid [*rad/s*] (15)
- h Hoogte tussen de bodem van de maatbeker en het onderste oppervlak van de spindel [*m*]

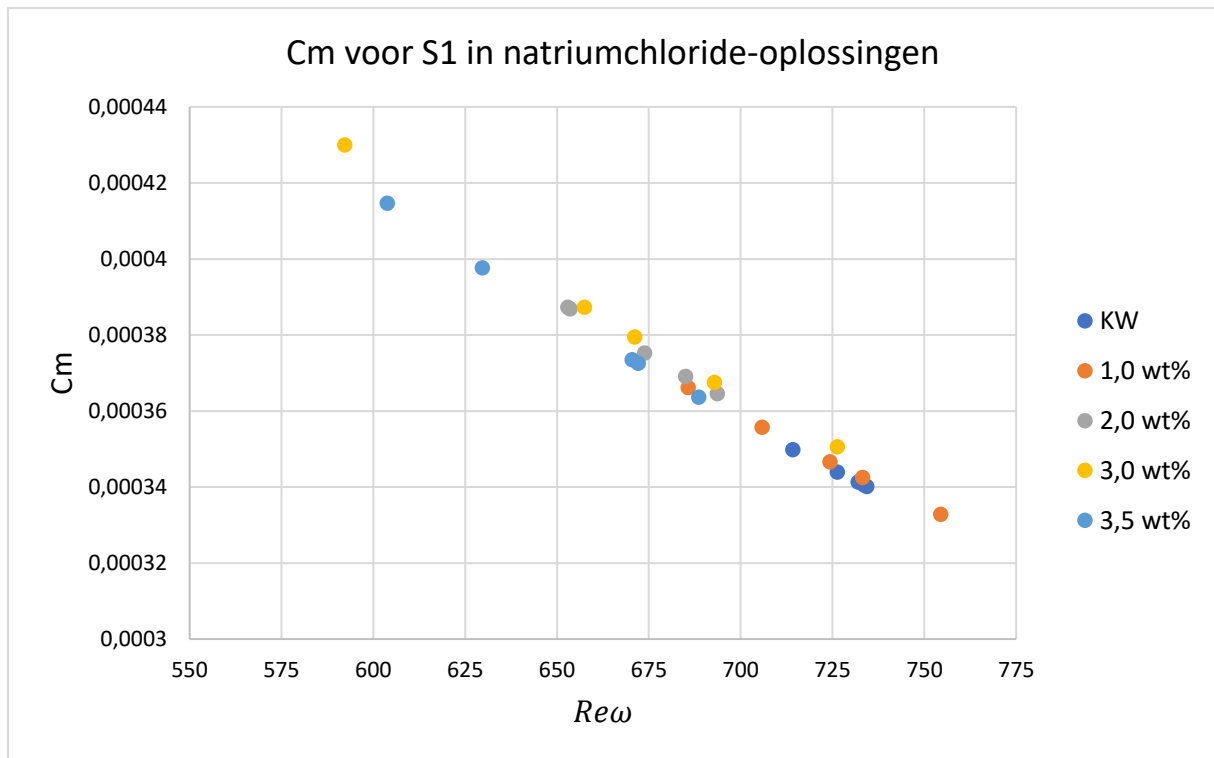
De hoeksnelheid wordt berekend met vergelijking (15).

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} \quad (15)$$

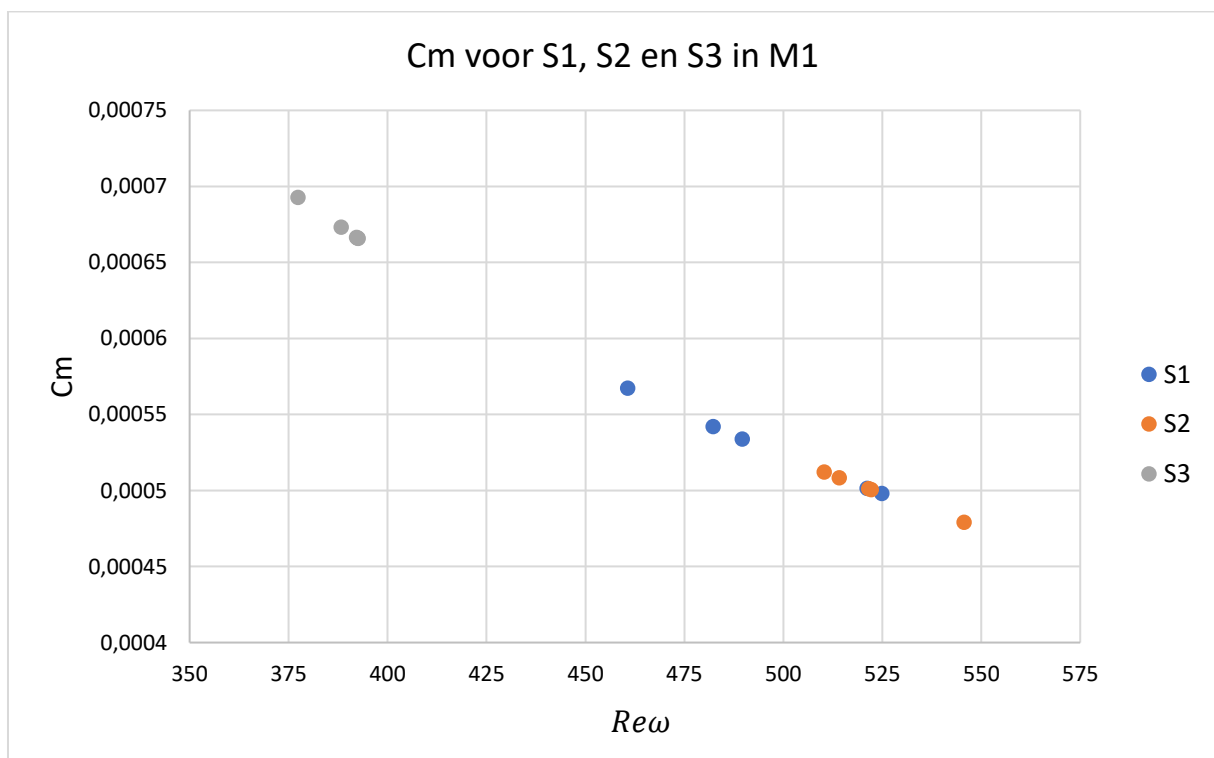
Waarbij:

- ω Hoeksnelheid [*rad/s*]
- N Toerental [*RPM*]

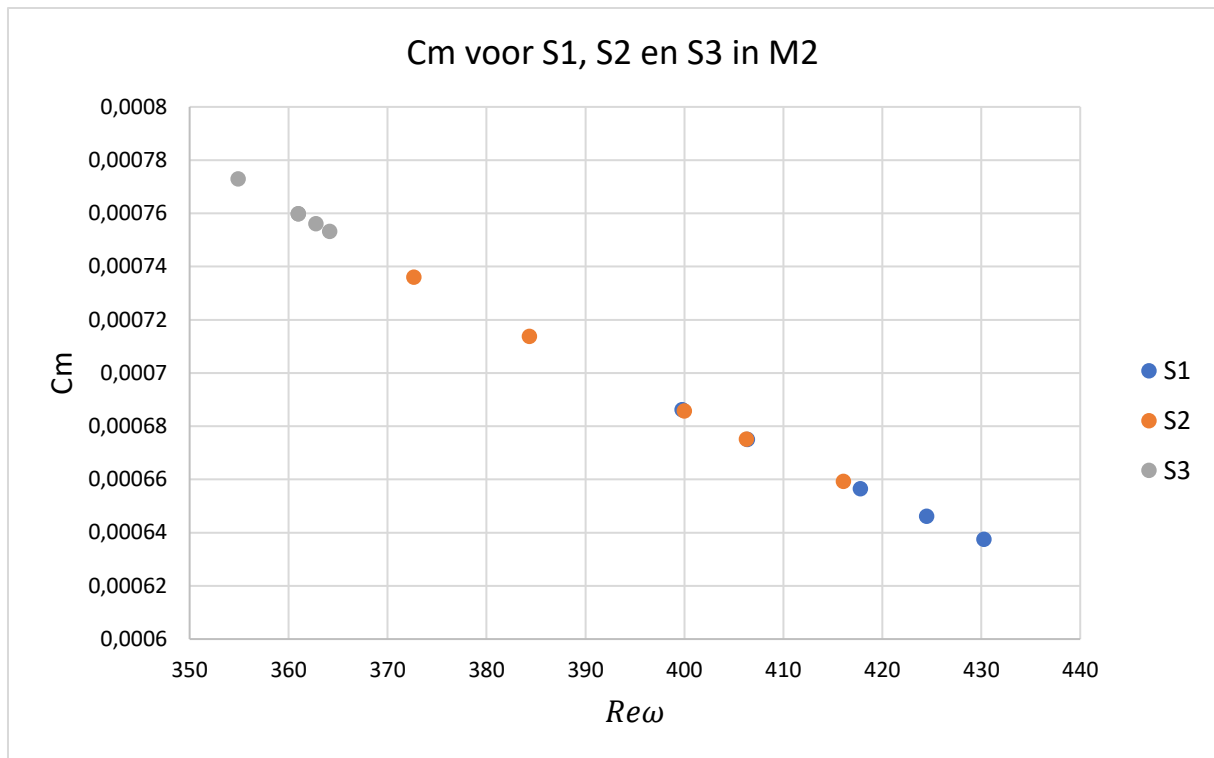
Dit wordt in eerste instantie gedaan voor de natriumchloride-oplossingen en de S1 spindel in **Figuur 50**. Daarna wordt dit verband afzonderlijk uitgezet voor elke water-glyceroloplossing: **Figuur 51** tot **Figuur 55**. Deze metingen worden niet op één grafiek geplot omdat de meetsnelheid verschillend is bij elk mengsel en bijgevolg het Reynoldsgetal sterk verschilt tussen de vijf mengsels.



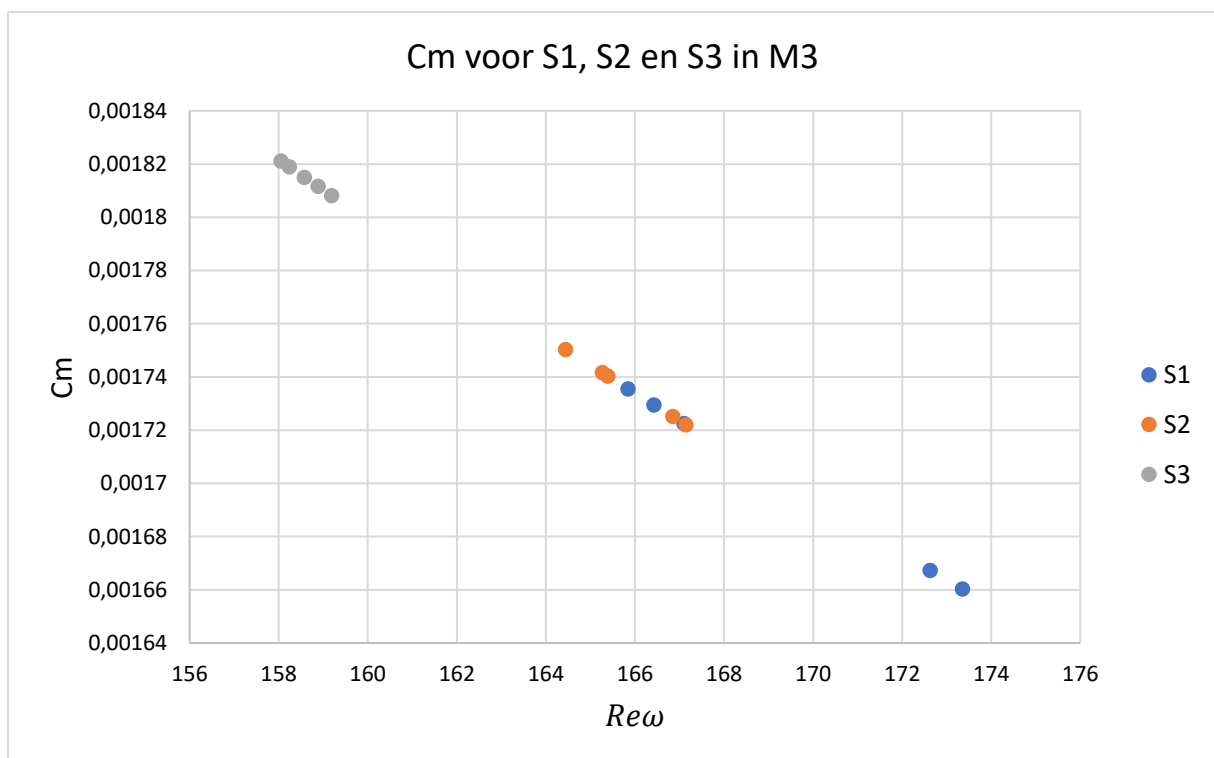
Figuur 50 Torsiecoëfficiënt voor S1 in natriumchloride-oplossingen
Bron: Eigen werk



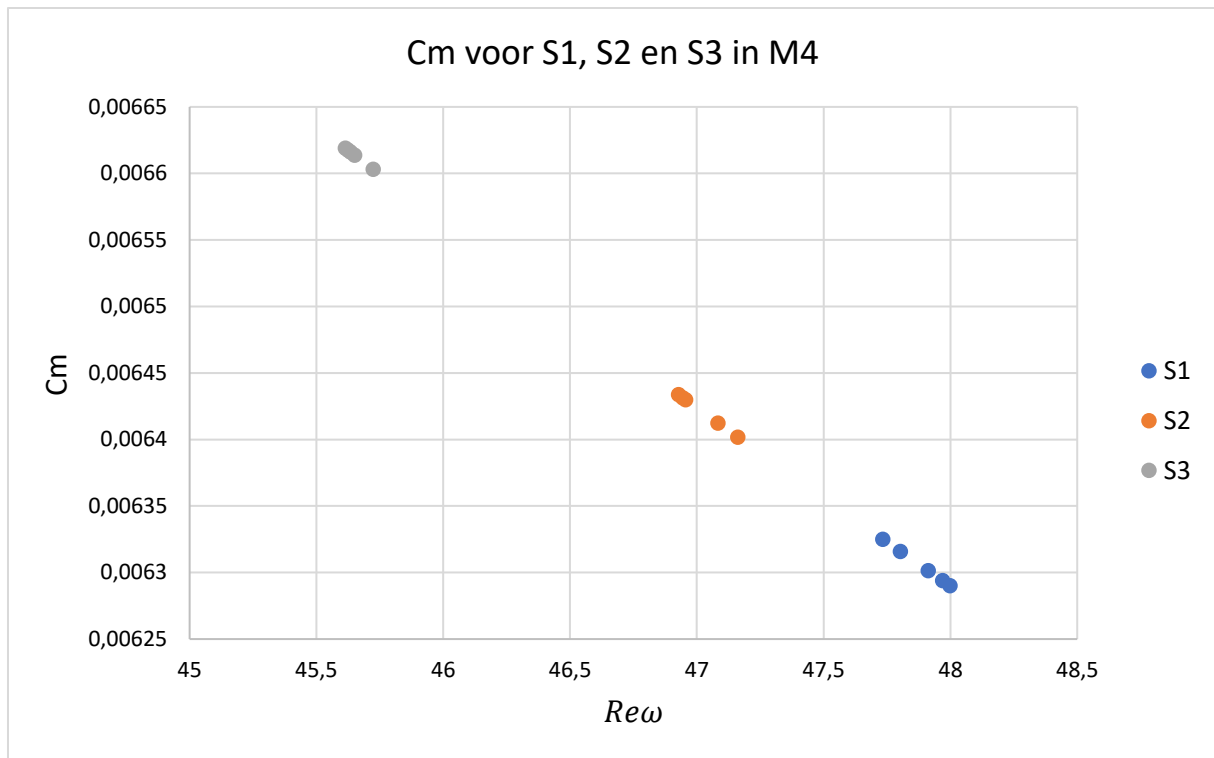
Figuur 51 Torsiecoëfficiënt voor S1, S2 en S3 in M1
Bron: Eigen werk



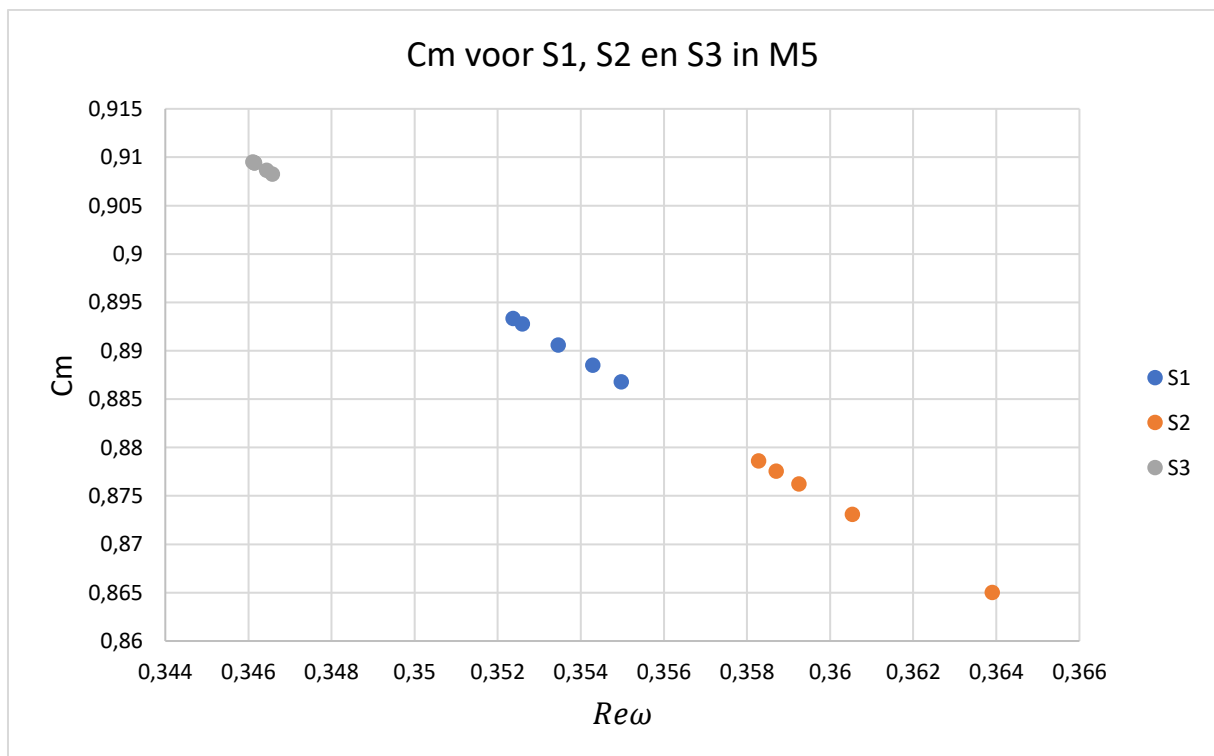
Figuur 52 Torsiecoëfficiënt voor S1, S2 en S3 in M2
Bron: Eigen werk



Figuur 53 Torsiecoëfficiënt voor S1, S2 en S3 in M3
Bron: Eigen werk



Figuur 54 Torsiecoëfficiënt voor S1, S2 en S3 in M4
Bron: Eigen werk



Figuur 55 Torsiecoëfficiënt voor S1, S2 en S3 in M5
Bron: Eigen werk

In **Figuur 50** ziet men dat de mengsels met een grotere dichtheid gepaard gaan met een grotere C_m en een lager Reynoldsgetal. Eerder werd vastgesteld in **Tabel 10** dat de viscositeit van de natriumchloride-oplossingen stijgt met een toenemende dichtheid. Dit verklaart waarom C_m groter is voor de testfluida met grotere dichtheden. Aangezien de verschillen in dichtheid miniem zijn tussen de oplossingen, is het niet mogelijk om een duidelijk onderscheid te maken voor de waarden van de torsiecoëfficiënt. Het Reynoldsgetal is lager bij hogere dichtheden en éénzelfde rotatiesnelheid. Dit komt wederom omdat de viscositeit hoger ligt voor deze oplossingen.

De viscositeit zal eveneens stijgen bij een toenemende dichtheid voor de waterige glyceroloplossingen (**Tabel 13**). Als gevolg stijgt de torsiecoëfficiënt met een toenemende viscositeit. Dit bevestigt dat de spindel meer weerstand ervaart door de hogere viscositeit van het fluïdum. De grootste toename van C_m gebeurt tussen $M4$ en $M5$. Dit is te wijten aan de grote viscositeitstoename tussen deze twee oplossingen (**Tabel 15**).

In **Figuur 51**, **Figuur 52**, **Figuur 53**, **Figuur 54** en **Figuur 55** onderscheidt de $S3$ spindel zich duidelijk van $S1$ en $S2$. $S3$ gaat gepaard met hogere torsiecoëfficiënten en lagere Reynoldsgetallen. Dit toont aan dat oppervlakteruwheid de torsiecoëfficiënt klaarblijkelijk beïnvloedt. In de t-testen werd geconcludeerd dat de waarden van $S1$ en $S2$ in $M1$, $M2$ en $M3$ niet genoeg verschillen van elkaar om een duidelijk verband te onderscheiden. In $M4$ en $M5$ wordt geen duidelijke trend gevonden tussen $S1$ en $S2$. Uit bovenstaande resultaten kan men aannemen dat de coating *Sigmacover 280* in dit onderzoek weinig tot geen weerstand heeft toegevoegd aan de $S2$ spindel in vergelijking met de blanke spindel $S1$.

De bekomen resultaten zijn in lijn met het onderzoek dat werd uitgevoerd door Schultz en Myers (**Figuur 15**). Merk op dat in het onderzoek van Schultz en Myers een torsiemeter werd gebruikt en geen rotatieviscosimeter (Schultz & Myers, 2003).

6 Conclusie

Het hoofddoel van dit onderzoek was om te achterhalen of deze alternatieve methode in de toekomst kan worden toegepast om de hydrodynamische eigenschappen van coatings te bepalen. Om deze kwestie te onderzoeken, is het noodzakelijk om de verkregen resultaten te vergelijken met diverse onderzoeken. Dit is alleen mogelijk wanneer de viscositeitsmeting naar een weerstandscoëfficiënt C_f wordt omgezet. Dit verband werd echter niet gevonden. Als dit verband wordt ontdekt, is het mogelijk om toekomstige resultaten gemakkelijk en snel te vergelijken met verschillende onderzoeken, zoals bijvoorbeeld testen in sleeptanks. Het is noodzakelijk om deze resultaten nog verder te vergelijken met andere onderzoeken om de juistheid van deze methode na te gaan.

Als alternatief voor het eerder genoemde probleem is er een formule toegepast die de onderlinge relatie tussen de dynamische viscositeit en de coëfficiënt van torsie C_m weergaf (Vergelijking (14)). Zo kon de invloed van de oppervlakteruwheid op de weerstand worden bestudeert. Een grotere torsiecoëfficiënt gaat gepaard met meer weerstand. De torsiecoëfficiënt werd uitgezet in functie van het Reynoldsgetal voor de drie spindels. Op basis van de verzamelde data kan worden vastgesteld dat er sprake is van een positieve correlatie tussen de coëfficiënt van torsie C_m en de oppervlakteruwheid. Dit stelt ons in staat om een verband te identificeren tussen deze twee factoren. Indien er verder wordt gebouwd op dit onderzoek, moet vergelijking (14) verder worden onderzocht. Er werd weinig informatie gevonden omtrent deze formule.

Er werd reeds besloten dat het in theorie mogelijk is om een alternatieve methode te ontwikkelen voor het bepalen van de oppervlakteruwheid van coatings (Hendriks, 2020). De HAAKE viscotester D type R bleek echter niet het ideale toestel te zijn voor dit onderzoek. Een beter keuze voor het meetinstrument zou een coaxiale dubbele cilinder rotatieviscosimeter zijn of een torsiemeter die ons rechtstreeks C_m geeft.

7 Bibliografie

Basic Boundary Layer Theory. (2021). [Technical Support]. *Altair AcuSolve*.

https://2021.help.altair.com/2021/hwsolvers/acusolve/topics/acusolve/training_manual/basic_boundary_layer_theory_r.htm

Bhushan, B. (2001). Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques. In *Modern Tribology Handbook* (Vol. 2, p. 71). CRC Press.

https://www.researchgate.net/profile/Mohamed_Mourad_Lafifi/post/How-do-I-calculate-the-surface-area-in-terms-standard-deviation-and-correlation-length/attachment/5ccc26cd3843b01b9b9de247/AS%3A754436762787840%401556883149357/download/Surface+Roughness+Analysis+and+Measurement+Techniques.pdf

Brush, S. G. (1962). Theories of Liquid Viscosity. *Chemical Reviews*, 62(6), Art. 6.

<https://doi.org/10.1021/cr60220a002>

Carlton, J. (2019). *Marine Propellers and Propulsion (Fourth Edition): Vol. Hoofdstuk 7*.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100366-4.00007-9>

Chaitanya Lahari, M. L. R., Sessa Talpa Sai, P. H. V., Narayanaswamy, K. S., HaseenaBee, P.,

Devaraj, S., & Sharma, K. V. (2019). Experimental determination of viscosity of Water-Glycerine based Cu nano-fluids. *Materials Today: Proceedings*, 19(2), 517–520.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.646>

Cheng, N. S. (2008). Formula for the Viscosity of a Glycerol–Water Mixture. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47(9), 3285–3288.

<https://doi.org/10.1021/ie071349z>

- Chhabra, R. P. (2010). Non-Newtonian Fluids: An Introduction. In *Rheology of Complex Fluids: Vol. Hoofdstuk 1* (New York, USA; pp. 3–34). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6494-6_1
- Danvin, F., & Jullien, M. (2017). *Study on k-w shear stress transport model corrections applied to rough wall turbulent hypersonic boundary layers*. 14.
<https://doi.org/10.13009/EUCASS2017-604>
- Dennington, S., Jackson, A., Finnie, A. A., Wharton, J. A., Longyear, J. E., & Stoodley, P. (2021). A rapid benchtop method to assess biofilm on marine fouling control coatings. *Biofouling*, 37(4), 452–464.
<https://doi.org/10.1080/08927014.2021.1929937>
- Dennington, S., Mekkhunthod, P., Rides, M., Gibbs, D., Salta, M., Stoodley, V., Wharton, J., & Stoodley, P. (2015). Miniaturized rotating disc rheometer test for rapid screening of drag reducing marine coatings. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 3(034004), 9. <https://doi.org/10.1088/2051-672X/3/3/034004>
- Dmitrenko, A. V. (2021). Determination of Critical Reynolds Number for the Flow Near a Rotating Disk on the Basis of the Theory of Stochastic Equations and Equivalence of Measures. *Fluids*, 6(5), 11. <https://doi.org/10.3390/fluids6010005>
- Doran, P. M. (2013). Fluid Flow. In *Bioprocess Engineering Principles (Second Edition)* (Vol. 7, pp. 201–254). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-220851-5.00007-1>
- Duan, X. X., Parris, T., Kazlauciusas, A., & Guthrie, J. (2017). Preparation, characterization, and analysis of anti-corrosion subsea coating. *Journal of Coatings Technology and Research*, 14(2017), 823–827. <https://doi.org/10.1007/s11998-016-9889-y>
- Eng Giap Goh, S. (2010). The Hidden Property of Arrhenius-type Relationship: Viscosity as a Function of Temperature. *Journal of Physical Science*, 21(1), Art. 1.

- Ferreira, A. G. M., Egas, A. P. V., Fonseca, I. M. A., Costa, A. C., Abreu, D. C., & Lobo, L. Q. (2017). The viscosity of glycerol. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, *113*, 162–182. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jct.2017.05.042>
- George, H. F., & Qureshi, F. (2013). *Newton's Law of Viscosity, Newtonian and Non-Newtonian Fluids*. Springer, Boston, MA. DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5_143
- Gibril, M., El-Jazwi, R., & Shuaib F.M. (2007). *Recent Advances in Protective Coating of Crude Oil Storage Tanks*. 460–472.
- Gonzalez, J. A. T., Longinotti, M. P., & Corti, H. R. (2011). The Viscosity of Glycerol-Water Mixtures Including the Supercooled Region. *Journal of Chemical & Engineering Data*, *56*, 1397–1406. <https://doi.org/10.1021/je101164q>
- Go!Temp® (US). (2014). Vernier Software & Technology. <https://www.vernier.com/product/gotemp/>
- Gupta, S. V. (2014). *Viscometry for liquids* (1st ed.). Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-04858-1>
- HAAKE viscotester D - Instruction Manual. (2018). Thermo Fisher Scientific. www.thermofisher.com
- HAAKE™ Viscotester™ E, D and C Rotational Viscometer. (2020). Thermo Fisher Scientific Inc. <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/362-0012#/362-0012>
- Hendriks, B. (2020). *Alternatieve methode om wrijvingsverlies van coatings te bepalen* [Wetenschappelijk onderzoek]. Antwerp Maritime Academy.
- Heuzé, T., Leblond, J. B., & Bergheau, J. M. (2014). Benchmark tests based on the Couette viscometer—I: Laminar flow of incompressible fluids with inertia effects and thermomechanical coupling. *Computers and Mathematics with Applications*, *67*, 1925–1937. <http://dx.doi.org/10.1016/j.camwa.2014.03.013>

- Holm, E., Schultz, M., Haslbeck, E., Talbott, W., & Field, A. (2004). Evaluation of Hydrodynamic Drag on Experimental Fouling-release Surfaces, using Rotating Disks. *Biofouling: The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, 20(4–5), 219–226. <https://doi.org/10.1080/08927010400011245>
- Howell, D., & Behrends, B. (2006). A review of surface roughness in antifouling coatings illustrating the importance of cutoff length. *Biofouling: The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, 22(6), 401–410. <http://dx.doi.org/10.1080/08927010601035738>
- Hu, H., Gao, L., & Liu, Y. (2022). Hydro-/ice-phobic coatings and materials for wind turbine icing mitigation. In *Wind Turbine Icing Physics and Anti-/ De-icing Technology* (Vol. 6, pp. 135–168). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824532-3.00500-3>
- ISO 2555 (European Standard ISO 2555:2018; Nummer ISO 2555:2018, p. 17). (2018). International Organization for Standardization. www.nbn.be
- ISO 8503 (European Standard ISO 8503-1:2012). (2012). International Organization for Standardization.
- Kaur, J., Sarma, A. K., Jha, M. K., & Gera, P. (2020). Valorisation of Crude Glycerol to Value-added products: Perspectives of process technology, economics and environmental issues. *Biotechnology Reports*, 487, 44. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00487>
- Kurkin, E. I., Chertykovtseva, V. O., & Zakhvatkin, Y. V. (2020). Processing a Brookfield Rotational Viscometer Measurement Results in the MATLAB. *Key Engineering Materials*, Vol. 834, Art. Vol. 834. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.834.82>
- Lachmann, G. V. (1961). *Boundary Layer and Flow Control: Its Principles and Application: Vol. Volume 2*. Pergamon Press LTD.

- Lane, L. B. (1925). Freezing Points of Glycerol and Its Aqueous Solutions. *Industrial and Engineering Chemistry*, 17(9), 924. <https://doi.org/10.1021/ie50189a017>
- Malik, M., Dey, J., & Alam, M. (2008). Linear stability, transient energy growth, and the role of viscosity stratification in compressible plane Couette flow. *Physical Review E*, 77(036322), 15. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.77.036322>
- Merlone, A., Lacomini, L., Tiziani, A., & Marcarino, P. (2007). A liquid bath for accurate temperature measurements. *Measurement*, 40(4), Art. 4. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2006.06.006>
- Michal, S., Hana, N., & Jan, K. (2017). The determination of viscosity at liquid mixtures – Comparison of approaches. *AIP Conference Proceedings*, 1889(020035), 5. <https://doi.org/10.1063/1.5004369>
- Mixing High Viscosity Solutions with the Vitl Co-Mix Laboratory Mixer*. (2015). Vitl products. <https://www.vitlproducts.com/images/uploads/files/1001-AN-001-Rev1-Co-mix-Viscosity-Test-Paper.pdf>
- Mulder, J. (2011). *Stroming van beton in diepwanden* [Master thesis]. TU Delft.
- New Surfctest® SJ-310 Surface Roughness Tester. (z.d.). Mitutoyo. Geraadpleegd 18 maart 2023, van <https://www.mitutoyo.com/news/new-surfctest-sj-310-surface-roughness-tester/>
- Paepe, A. S. (2021). *Bepalen van de oppervlakteruwheid van verf met behulp van een rotatie viscometer* [Wetenschappelijk onderzoek]. Antwerp Maritime Academy.
- Papanikolaou, M., Frank, M., & Drikakis, D. (2017). Effects of surface roughness on shear viscosity. *Physical Review E*, 95(033108), 7. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.95.033108>

Pistone, A., Scolaro, C., & Visco, A. (2021). Mechanical Properties of Protective Coatings against Marine Fouling: A Review. *Polymers*, 13(173), 19.

<https://doi.org/10.3390/polym13020173>

Product Data Sheet: Sigmacover™ 280. (2021). PPG Industries.

<https://docs.td.ppgpmc.com/download/429/907/sigmacover-280>

Quick Guide to Precision Measuring Instruments. (2016). Mitutoyo.

<https://www.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/E110033.pdf>

Radhakrishnan, A. K. T., van Lier, J., & Clemens, F. (2018). Rheology of Un-Sieved

Concentrated Domestic Slurry: A Wide Gap Approach. *Water*, 10(1287), 13.

<https://doi.org/10.3390/w10101287>

Rahman, M., Islam, R., Rana, S. M., Halder, R., Hassan, T., & Ahmed, S. (2014). *Design,*

Construction & Performance Test of a Rotational Digital viscometer. Volume 3, 6.

<http://www2.kuet.ac.bd/icmiee2014/wp-content/uploads/2015/02/ICMIEE-PI-140403.pdf>

Rapp, B. E. (2017). Fluids. In *Microfluidics: Modelling, Mechanics and Mathematics: Vol.*

Chapter 9-Fluids (p. 21). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-02230-2>

Rebout, F. (2022). Effect of Polymers on Transient Reynolds Number Change in Pipe Flow

and Reduction of their Coefficient of Friction. *Eurasian Journal of Chemical, Medicinal*

and Petroleum Research, 1(1), 20–32. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7353464>

Replacement Spindles for Brookfield Rotational Viscometers. (z.d.). [Bedrijf van

wetenschappelijke apparatuur]. *Cole-Parmer: An Antylia Scientific Company*.

Geraadpleegd 11 mei 2023, van <https://www.coleparmer.com/>

- Roughness measurements of stainless steel surfaces*. (2014). Euro Inox.
https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/RoughnessMeasurement_EN.pdf
- Rouse, H. (Regisseur). (2011). *Characteristics of the Laminar and Turbulent Flows* (Vol. 2).
<https://www.iahrmedialibrary.net/the-library/methods-in-hydraulics/fluid-mechanics/characteristics-of-the-laminar-and-turbulent-flows-hunter-rouse/243>
- Schetz, J. A., & Bowersox, R. D. W. (2011). *Boundary Layer Analysis: Second Edition*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.
- Schmidt, H., Seitz, S., Hassel, E., & Wolf, H. (2018). The density-salinity relation of standard seawater. *Ocean Science*, 14(1), Art. 1. <https://doi.org/10.5194/os-14-15-2018>
- Schneidkraut, M., Kaplan, K., & Chen, H. (z.d.). Viscometers [Informerend]. *Michigan Engineering: Visual Encyclopedia of Chemical Engineering Equipment*. Geraadpleegd 30 april 2023, van <https://encyclopedia.che.engin.umich.edu/viscometers/>
- Schultz, M. P., & Myers, A. (2003). Comparison of three roughness function determination methods. *Experiments in Fluids*, 35, 372–379. <https://doi.org/10.1007/s00348-003-0686-x>
- SDA. (1963). *Physical properties of glycerine and its solutions*. Glycerine Producer's Association.
https://www.aciscience.org/docs/Physical_properties_of_glycerine_and_its_solutions.pdf
- Sforza, P. (2014). Drag Estimation. In *Commercial Airplane Design Principles* (Vol. 9, pp. 349–404). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-419953-8.00009-7>

Surface Roughness Terminology and Parameters. (z.d.). Precision Devices, Inc. Geraadpleegd

18 maart 2023, van

https://www.predev.com/pdf/files/surface_roughness_terminology_and_parameters.pdf

Surface Texture (Roughness, Waviness, Lay) (American Standard B46.1-2019; p. 144). (2020).

The American Society of Mechanical Engineers.

Surftest SJ-310 [mm]. (z.d.). [Omschrijving van het toestel]. *Mitutoyo*. Geraadpleegd 18

maart 2023, van

[https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en_RO/mitutoyo/1292249267209/Surftest%20SJ-310%20%5Bmm%5D/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/178-570-11D/index.xhtml?jsessionid=E6960E3C7EF0903739BACDDAA8595853](https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en_RO/mitutoyo/1292249267209/Surftest%20SJ-310%20%5Bmm%5D/$catalogue/mitutoyoData/PR/178-570-11D/index.xhtml?jsessionid=E6960E3C7EF0903739BACDDAA8595853)

Takamura, K., Fischer, H., & Morrow, N. R. (2012). Physical properties of aqueous glycerol solutions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 98–99, 50–60.

<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.09.003>

Tan, H. W., Abdul Aziz, A. R., & Aroua, M. K. (2013). Glycerol production and its applications as a raw material: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 118–

127. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.035>

Trinh, K. T. (2010). *On The Critical Reynolds Number For Transition From Laminar To Turbulent Flow* (Nieuw Zeeland). arXiv:1007.0810.

<https://doi.org/10.48550/arXiv.1007.0810>

Turney, S. (2022, april 29). Student's Table: Guide & Examples [Informerend]. *Scribbr*.

Van Canneyt, K., & Verdonck, P. (2014). Mechanics of Biofluids in Living Body. In

Comprehensive Biomedical Physics: Vol. Volume 10 (pp. 39–53).

<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53632-7.01003-0>

Viswanath, D. S., Ghosh, T. K., Prasad, D. H. L., Dutt, N. V. K., & Rani, K. Y. (2007). *Viscosity of Liquids: Theory, Estimation, Experiment, and Data*. Springer.

https://books.google.be/books?id=TD3TeErQD-oC&printsec=frontcover&hl=nl&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Volk, A., & Kähler, C. J. (2018). Density model for aqueous glycerol solutions. *Experiments in Fluids*, 59(75), 5. <https://doi.org/DOI:10.1007/s00348-018-2527-y>

Weinell, C. E., Olsen, K. N., Christoffersen, M. W., & Kill, S. (2003). Experimental Study of Drag Resistance Using a Laboratory Scale Rotary Set-up. *Biofouling: The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, 19(S1), 45–51.

<http://dx.doi.org/10.1080/0892701031000072118>

Wu, W., & Piomelli, U. (2018). Effects of surface roughness on a separating turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 841, 552–580.

<https://doi.org/doi:10.1017/jfm.2018.101>