

Ontwerp van een meetopstelling ter validatie van een numeriek kniemodel

Citation for published version (APA):

Feron, R. P. M. J. (1992). *Ontwerp van een meetopstelling ter validatie van een numeriek kniemodel*. (DCT rapporten; Vol. 1992.114). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1992

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

**Ontwerp van een meetopstelling ter
validatie van een numeriek kniemodel**

R.P.M.J. Feron

Rapport nr.: WFW.92.114

Ontwerp van een meetopstelling ter validatie van een numeriek kniemodel

Stageverslag

Auteur: Raymond Feron

Stagebegeleiders: - Monique van Lankveld
- Cees Oomens

Eindhoven, september 1992

VAKGROEP FUNDAMENTELE WERKTUIGKUNDE
FACULTEIT WERKTUIGBOUWKUNDE
TECHNISCHE UNIVERSITEIT EINDHOVEN

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING.....	1
1. INLEIDING.....	2
1.1. Inleiding	
1.2. Het kniegewricht	
1.2.1 Anatomie van de knie	
1.2.2 Een numeriek kniemodel	
1.3. Doelstelling	
2. NUMERIEKE ANALYSE.....	6
2.1. Inleiding	
2.2. Invoergegevens	
2.3. De elementen en de elementenmesh	
2.4. Belasting en randvoorwaarden	
2.4.1 Belasting	
2.4.2 Randvoorwaarden	
2.5. Resultaten	
2.6. Conclusies	
3. DE MEETOPSTELLING.....	12
3.1. Inleiding	
3.2. Schematische weergave meetopstelling	
3.3. De onderdelen van de meetopstelling	
3.3.1 De meetsectie	
3.3.2 Het MCA100-meetinstrument	
3.3.3 ASYST	
4. EXPERIMENTEN.....	17
4.1. Inleiding	
4.2. Het ijken van de drukopnemers	
4.3. Het meetprotocol	
4.4. Onnauwkeurigheden	
4.5. Instellen van het ASYST-programma	
4.5.1. Instellen van ASYST bij $d_{st} = 30$ mm	
4.4.2. Instellen van ASYST bij $d_{st} = 10$ mm	
4.6. Metingen en verwerking van de meetresultaten	
5. VERGELIJKING VAN NUMERIEKE MET EXPERIMENTELE RESULTATEN	23
5.1. Vergelijking van het experiment met het numerieke model	
5.2. Mogelijke oorzaken van nog niet verklaarde verschillen	

6.	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....	26
6.1.	Conclusies	
6.2.	Aanbevelingen	

LITERATUUR.....	27
-----------------	----

BIJLAGEN:

BIJLAGE 1.	GEBRUIKTE PROGRAMMATUUR.....	28
Bijlage 1A.	Meshgeneratieprogramma's	
Bijlage 1B.	Invoerprogramma schd10.dat voor $d_{st} = 10$ mm	
Bijlage 1C.	Rekenprogramma schd10.com voor $d_{st} = 10$ mm	

SAMENVATTING

Het kniegewricht is niet alleen een complex lichaamsdeel, maar het is ook één van de zwaarst belaste gewrichten van het menselijk lichaam. De knie is dan ook een bron van sportblessures en staat volop in de belangstelling.

Aan de TUE werkt men thans binnen de vakgroep WFW aan een numeriek kniemodel. Men wil gaan onderzoeken in hoeverre de berekeningen die worden verkregen met dit kniemodel de fysische werkelijkheid benaderen. Daartoe zal het numerieke kniemodel worden nagebouwd en zullen er op experimentele wijze verplaatsingsvelden en vloeistofdrukken worden gemeten. Daarna kan aan de hand van een vergelijking van numerieke en experimentele resultaten de verificatie van de numerieke modellering plaatsvinden.

Doel van deze stage is om een drukmeetsysteem operationeel te maken voor het meten van vloeistofdrukken. In specifieke zin moet het met dit drukmeetsysteem mogelijk zijn om de druk onder een poreuze schijf (voorstellende kraakbeen van het onderbeen) te meten. Na het doen van voorbereidende numerieke berekeningen, wordt een meetsectie gebouwd en geïntegreerd in een complete meetopstelling. Dan worden er metingen uitgevoerd, waarna blijkt dat deze meetopstelling goed in staat is om de druk op 4 plaatsen onder de schijf te meten.

Uiteindelijk resultaat van deze stage is dus een instrument dat gebruikt kan worden ter validatie van een numeriek kniemodel aan de fysische realiteit.

1. INLEIDING

1.1. Inleiding

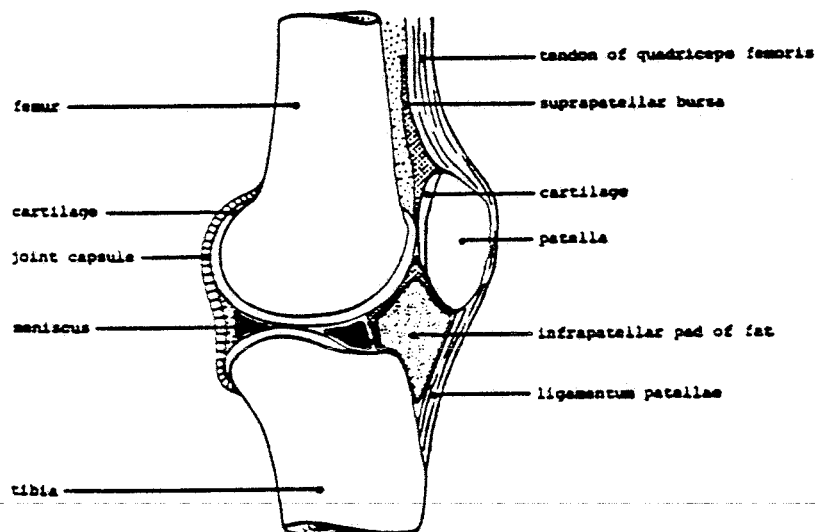
Vanuit allerlei hoeken van de wetenschap wordt gepoogd de werking van de gecompliceerde mechanische kant van het menselijk lichaam beter te begrijpen en beheersen. Een mogelijkheid hiertoe vormt het transformeren van een lichaamsdeel, met al haar complexe facetten, tot een numeriek model dat slechts bestaat uit enkele relevante onderdelen, waarvan de variabelen te controleren zijn. Altijd moet bij dit proces voorop staan dat het model, ondanks alle eenvoud, de werkelijkheid weerspiegelt. Als dat zo is kan o.a. worden nagegaan hoe een verandering van een parameter het functioneren van het geheel beïnvloedt. Constateringen die hieruit voortvloeien kunnen van groot belang zijn voor bijvoorbeeld de chirurgie.

Dit rapport beschrijft een onderzoek dat verricht is in het kader van het knieproject. De doelstelling van dat project is de bestudering van de krachtdoorleiding in het kniegewricht. Alvorens verder in te gaan op de werkwijze binnen dit project en de doelstelling van de hier gepresenteerde stage, wordt kort ingegaan op de anatomie van van de menselijke knie.

1.2. Het kniegewricht

1.2.1 Anatomie van de knie

Een van de meest complexe gewrichten in het menselijk lichaam is het kniegewricht. Het bestaat onder andere uit (zie figuur 1) een knieschijf (patella), menisci en de uiteindes van boven- en benedenbeen (femur en tibia):

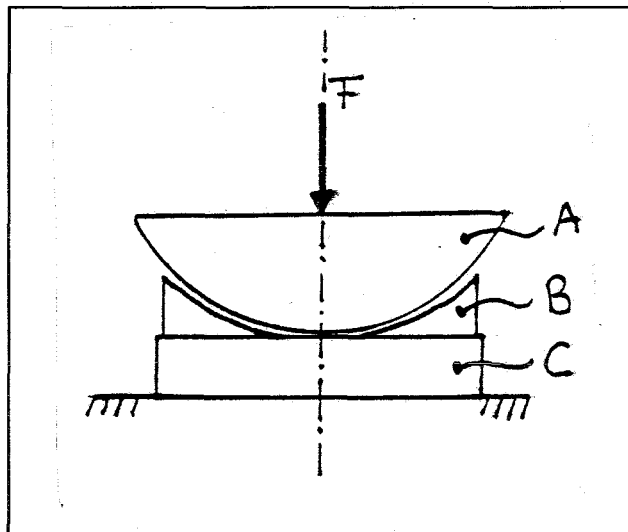


figuur 1: dwarsdoorsnede van het menselijk kniegewricht

De menisci zorgen voor een gedeelte van de krachtdoorleiding tussen het boven- en benedenbeen. Op elk der beenderen bevindt zich een kraakbeenlaag. Dit kraakbeen is een weefsel zonder bloed of zenuwen en bestaat uit een netwerk van molekulen, dat wordt versterkt door collageenvezels. Het is als het ware een poreuze vaste stof skelet, dat gevuld is met een visceuze vloeistof. Langs de kraakbeenlagen kunnen het boven- en benedenbeen t.o.v. elkaar bewegen. Dit gebeurt in een omgeving van synoviaalvloeistof. Kniebanden hebben de taak om alles bij elkaar te houden en om deze beweging tot een paar richtingen te beperken. Verder maken het geheel van factoren die het functioneren van de knie beïnvloeden, zoals stijfheden, heterogeniteiten, vezels, sterktes, etc. van de verschillende onderdelen, de knie tot zo'n ingewikkeld lichaamsdeel.

1.2.2 Een numeriek kniemodel

De eerste aanzet tot modellering bestaat uit (zie figuur 2; Schreppers [5]) een bolvormig gedeelte (A: simulatie van kop van bovenbeen), een poreus mengsel in de vorm van een meniscus (B) en een poreuze schijf (C: simulatie kraakbeen onderbeen).



figuur 2: numeriek kniemodel

Het numerieke kniemodel is qua geometrie eenvoudig van opzet, maar qua materiaalgedrag ingewikkeld. Op de eerste plaats zijn de schijf en de meniscus gemodelleerd als een mengselmateriaal (Oomens [4]; hfdst.5). Dit mengselmateriaal bestaat uit twee fasen, een vaste elastische matrixstructuur waarbinnen zich vloeistof bevindt. Wanneer op zo'n twee-fasen materiaal een drukkracht wordt uitgeoefend, zal de krachtdoorleiding eerst plaatsvinden via de vloeistof (visceus gedrag). Als vervolgens een bepaalde hoeveelheid vloeistof is weggeperst, zorgt de vaste

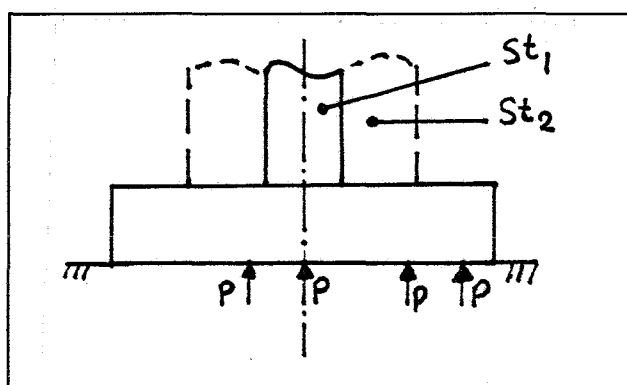
matrixstructuur voor de krachtdoorleiding (elastisch gedrag). De interactie tussen vloeistof en vaste stof veroorzaakt dus tijdsafhankelijk gedrag. Verder zijn voor een goede beschrijving van het glijden van de meniscus langs het kraakbeen van boven- en benedenbeen contactelementen noodzakelijk. Men denkt echter dat dit model het kniegedrag beter beschrijft dan een model met een ingewikkelde geometrie en eenvoudig materiaalgedrag.

De bedoeling is om, wanneer aan de bovenkant een kracht wordt opgelegd, met het model kniegedrag te simuleren. Daartoe wordt gebruik gemaakt van slechts een beperkt aantal te beïnvloeden parameters. Door middel van parametervariëaties wil men trachten inzicht te krijgen in de belangrijke factoren die invloed hebben op de krachtdoorleiding in het kniegewricht.

1.3. Doelstelling

In het numerieke model zitten een groot aantal aannames en benaderingen die het nodig maken om het te toetsen aan experimenten. Daartoe wordt een opstelling gebouwd waarin modellen van kunststof met mechanische eigenschappen die lijken op die van kraakbeen en meniscus op dezelfde wijze worden belast als in de numerieke simulatie. Door het meten van verplaatsingsvelden en vloeistofdrukken kunnen numerieke simulaties en experimenten worden vergeleken.

Hiermee komen we bij het hoofddoel van mijn stage. Deze is het ontwerpen en operationeel maken van een meetopstelling, waarmee op verschillende plaatsen de druk p onderaan de poreuze schijf kan worden gemeten. Om dit doel te verwezenlijken hoeft slechts de poreuze schijf van het kniemodel bekeken te worden. De kracht bovenop de schijf wordt aangebracht met een massieve stempel (zie figuur 3). Een tweede doel van mijn stage is om het drukverloop onderaan de schijf als functie van de diameter van de stempel (b.v. St_1 t.o.v. St_2) te meten en analyseren.



figuur 3: meetdoel

Allereerst worden numerieke berekeningen uitgevoerd. Met de daarmee verkregen resultaten en gegevens kan een keuze worden gemaakt uit verschillende drukopnemers en een meetsectie worden ontworpen. Deze wordt uitgebouwd tot een complete meetopstelling. Tenslotte worden de metingen uitgevoerd en de meetresultaten geanalyseerd, waarna er conclusies kunnen worden getrokken.

2. NUMERIEKE ANALYSE

2.1. Inleiding

De numerieke simulaties worden uitgevoerd met een bepaald doel. Ze dienen alleen maar ten behoeve van het ontwerp van de meetopstelling. Zo kunnen ze onder andere van dienst zijn bij de dimensionering van de meetsectie, bieden ze een kwalitatief beeld van de te verwachten verschijnselen en tijdschalen en geven ze een inzicht in de maximaal optredende drukken.

Er wordt gebruik gemaakt van DIANA 5.0 (De Borst [1]). Dit is een eindige elementenpakket, dat onder meer een tweefase materiaal-model bevat.

De hoogte van de schijf wordt gesteld op 10 mm. Om productietechnische redenen (zie 4.1) wordt daarmee de diameter van de schijf 50 mm. De diameters van de stempel waarmee de kracht wordt aangebracht (zie figuur 3) worden daarop afgestemd en zijn $d_{st}=10$ en $d_{st}=30$ mm.

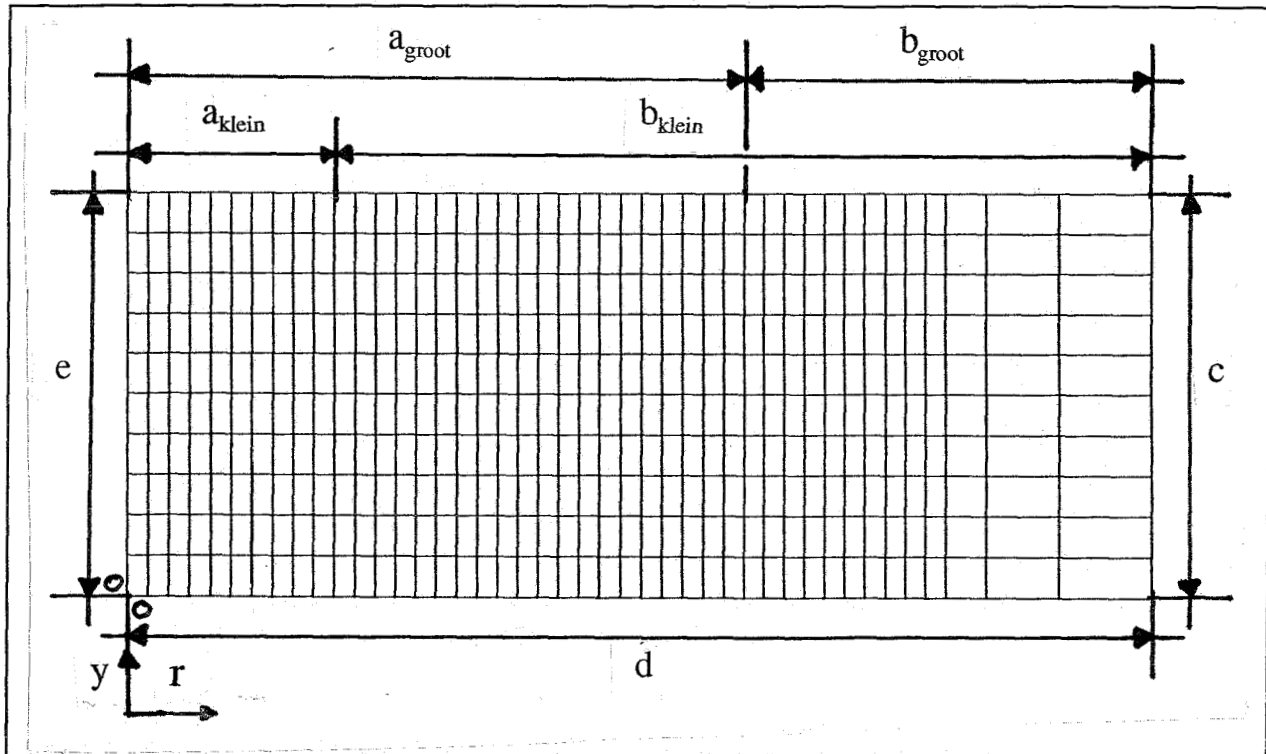
2.2. Invoergegevens

De elasticiteitsmodulus, dwarscontractiecoëfficiënt en permeabiliteit, van het mengsel waar de schijf van gemaakt is, zijn $E= 1.75 \text{ MPa} \pm 10\%$, $\nu=0.2$ en $K= 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^4/\text{Ns}$ en afkomstig van metingen aan andere proefstukken van het betreffende mengsel (De Heus [2]).

2.3. De elementen en de elementenmesh

Aangezien de schijf en opgelegde belasting axi-symmetrisch zijn, kan bij de numerieke analyse worden volstaan met een 2D-voorstelling van de halve schijf bij gebruikmaking van axisymmetrische elementen Q8AXI. Deze elementen hebben vier zijdes en berekenen een lineair verplaatsingsveld.

Onder de stempel waarmee de kracht wordt aangebracht wordt een fijne mesh verkozen, daarbuiten een grovere. Rekening houdende met de grootste stempel ($r_{st}=15$ mm) wordt met de DIANA meshgeneratie-optie (de mesh-generatie programma's zijn als bijlage 1A toegevoegd) de volgende mesh gegenereerd (figuur 4):



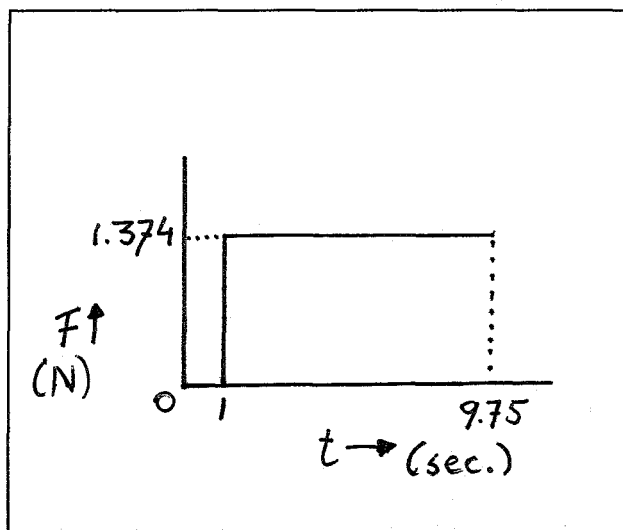
figuur 4: elementenmesh, waarbij de suffices 'groot' en 'klein' betrekking hebben op de stempeldiameter

2.4. Belasting en randvoorwaarden

2.4.1 Belasting

Hoe groot moet de kracht zijn die met de stempel wordt opgelegd? De maximale rek in het matrixmateriaal wordt $\varepsilon = 1\%$ gesteld, zodat de matrix zich bij benadering elastisch gedraagt. De kracht F wordt opgelegd door de stempel. Met een hier niet nader gespecificeerde berekening wordt een afchatting gemaakt van de kracht die voor die maximale rek in het matrixmateriaal nodig is: $F = 1.374 \text{ N}$

De belastingcurve heeft de vorm van een stapfunctie, zie figuur 5:



figuur 5: opgelegde belasting

2.4.2 Randvoorwaarden

Langs de verschillende randen van het numeriek te berekenen model (zie figuur 4) heersen de volgende randvoorwaarden:

- langs de lijn a_{klein} (resp. a_{groot}) geldt dat de verticale verplaatsingen van de knooppunten gekoppeld zijn (stempel is star)
- in het knooppunt linksboven wordt de kracht opgelegd in negatieve y-richting volgens de belastingcurve in figuur 5
- langs de lijnen b_{klein} (resp. b_{groot}) en c heerst atmosferische druk, waardoor aldaar de vergelijkdruk op nul wordt gesteld: $p=0 \text{ N/mm}^2$
- langs lijn d wordt de verticale verplaatsing v onderdrukt
- langs lijn e wordt, vanwege axisymmetrie, de horizontale verplaatsing u onderdrukt
- aangezien in de werkelijke proef de onderrand wordt omsloten door een ring (zie 3.3.1, figuur7), wordt in het knooppunt rechtsbeneden de horizontale verplaatsing u onderdrukt.

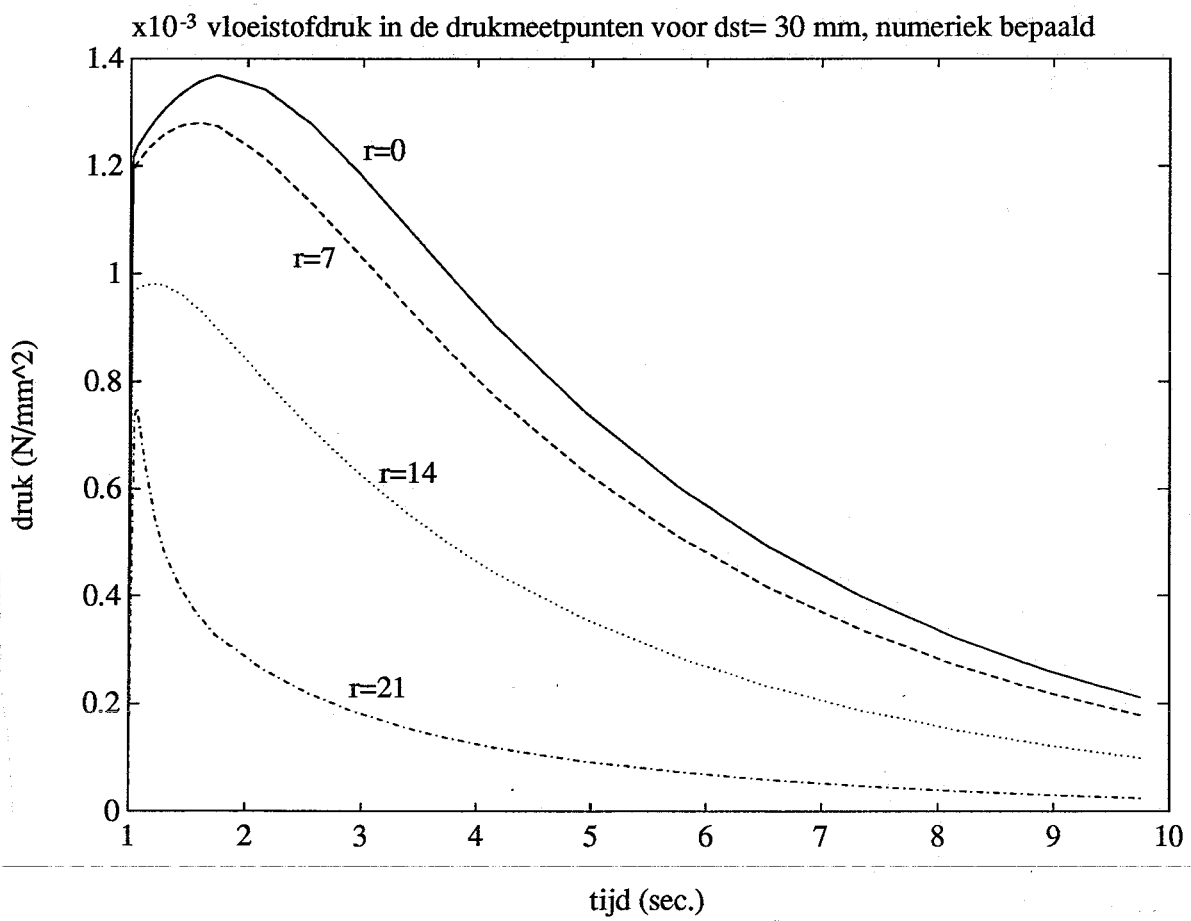
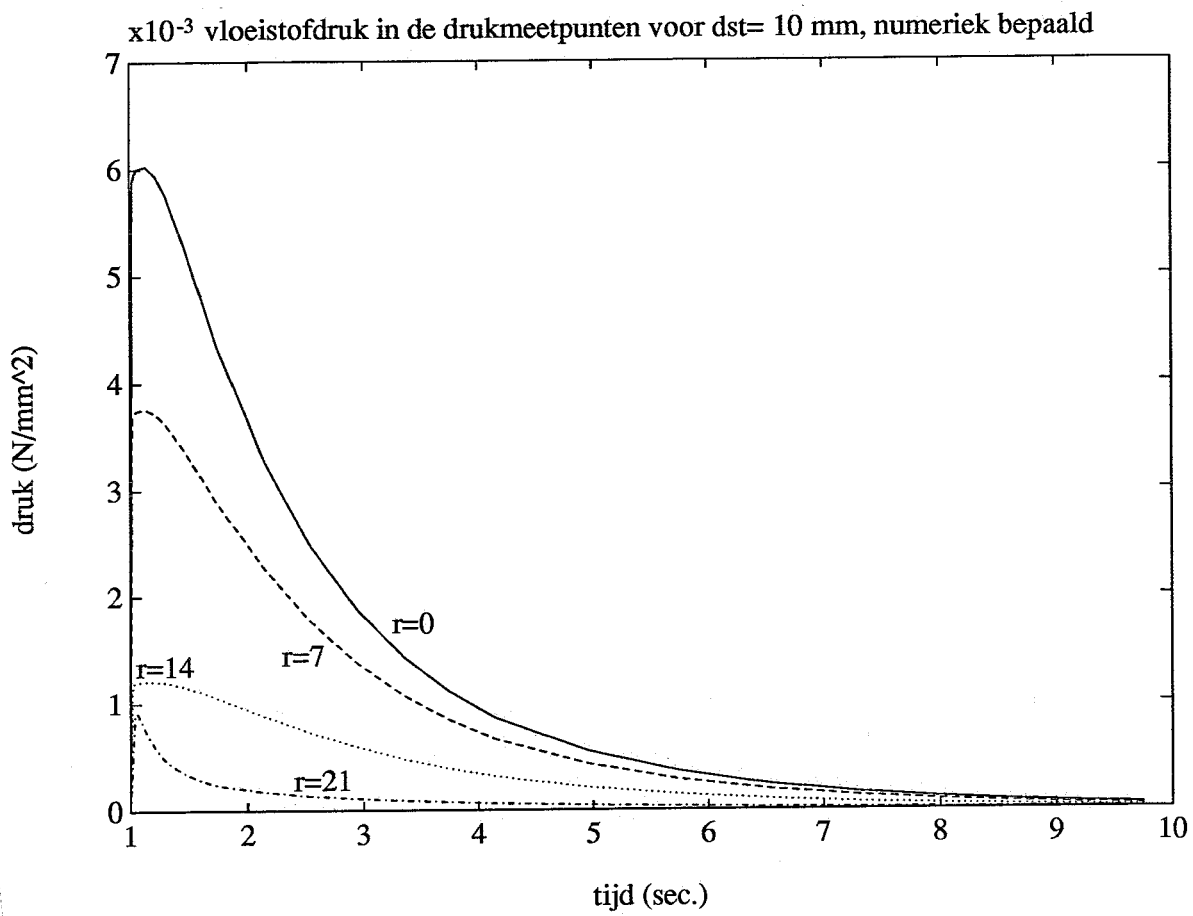
2.5. Resultaten

Het invoerprogramma schd10.dat en het rekenprogramma schd10.com voor de berekening van de schijf. In deze programma's wordt de kracht opgelegd met een stempeldiameter $d_{st} = 10$ mm. Ze zijn toegevoegd als bijlage 1B en 1C.

Bij de berekening is gekozen voor een Newton-Raphson iteratieproces met oplopende tijdstapgrootte. De eindtijd is 9.75 sec.

Het blijkt dat de maximale waarde van de rek 1.1 % (bij $d_{st} = 10$ mm) bedraagt en mag er worden aangenomen dat de vaste matrixstructuur zich elastisch gedraagt.

In figuur 6 op de volgende pagina zijn twee relevante grafieken afgebeeld. Ze geven een beeld van het drukverloop onder de schijf (op $y=0$) als functie van de tijd, in de verschillende drukmeetpunten (zie ook paragraaf 3.3.1, blz. 15). Bij de eerste grafiek is de kleine stempel gemodelleerd ($d_{st}=10$ mm), terwijl de tweede grafiek het genoemde drukverloop bij een grote stempel ($d_{st}=30$ mm) weergeeft.



figuur 6: drukverloop in de drukmeetpunten als functie van de tijd

2.6. Conclusies

Uit de grafieken kan het volgende geconcludeerd worden:

- De druk in het midden ($r=0$) heeft altijd de grootste maximale waarde, terwijl het buitenste drukmeetpunt ($r=21$) altijd de laagste maximale druk meet.
- Bij de kleine stempel is de maximale waarde van de druk voor alle drukmeetpunten groter dan bij de grote stempel. Dit is het duidelijkst bij $r=0$ en $r=7$ mm, want het quotiënt $(P_{\max} \text{ bij } d_{st}=10 \text{ mm}) / (P_{\max} \text{ bij } d_{st}=30 \text{ mm})$ neemt af naar buiten toe. Dit quotiënt bedraagt ongeveer 4.4 bij $r=0$, 2.9 bij $r=7$ en 1.2 bij $r=14$ en $r=21$ mm.
- De druk bereikt niet alleen eerder de maximale waarde bij de kleine stempel, maar neemt daarna ook sneller af dan bij de grote. Tevens zal de druk bij de kleine stempel sneller zijn uitgedempt.
- Ook als je naar de relatieve drukopbouw per stempeldiameter kijkt (druk van overige drukmeetpunten t.o.v. de druk bij $r=0$) valt de afhankelijkheid van de stempeldiameter op. Relatief gezien ligt de druk van $r=7$ en $r=14$ bij grote stempeldiameter ($d_{st}=30$), namelijk op een hoger niveau dan bij kleine stempeldiameter ($d_{st}=10$). Dit komt doordat in het eerste geval de drukmeetpunten $r=7$ en $r=14$ zich binnen de stempeldiameter bevinden, terwijl ze daar bij kleine stempeldiameter buiten liggen.
- In het algemeen wordt de maximale druk eerder bereikt naarmate het drukmeetpunt verder van het midden van de schijf verwijderd is. Dit geldt niet bij $d_{st}=10$ mm voor $r=21$ mm.

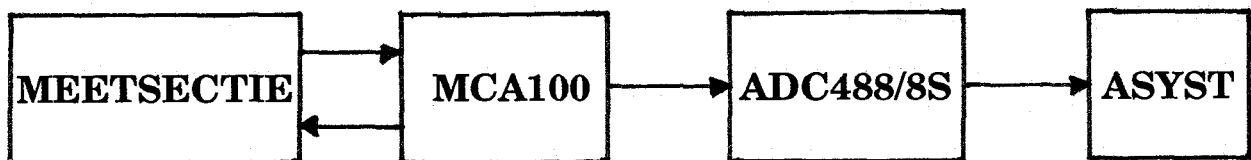
3. DE MEETOPSTELLING

3.1. Inleiding

Om experimenteel de vloeistofdruk onder een poreuze schijf te kunnen meten, zal er een meetsectie worden gebouwd die wordt opgenomen in een meetopstelling. Allereerst wordt er een schematische weergave van de complete meetopstelling gegeven, waarna kort de verschillende onderdelen worden besproken.

3.2. Schematische weergave meetopstelling

De schematische weergave van de complete meetopstelling ziet er als volgt uit:



figuur 8: schema meetopstelling

Metingen worden verricht door de meetsectie die zowel signalen verstuurt naar als ontvangt van het MCA100-meetinstrument. Nadat de ADC488/8S converter de uitgangssignalen van de MCA100 heeft bewerkt, gaan ze naar het programma ASYST toe, waar ze verder verwerkt worden.

3.3. De onderdelen van de meetopstelling

3.3.1 De meetsectie

Bij het ontwerp van de meetsectie is uitgegaan van het volgende eisenpakket:

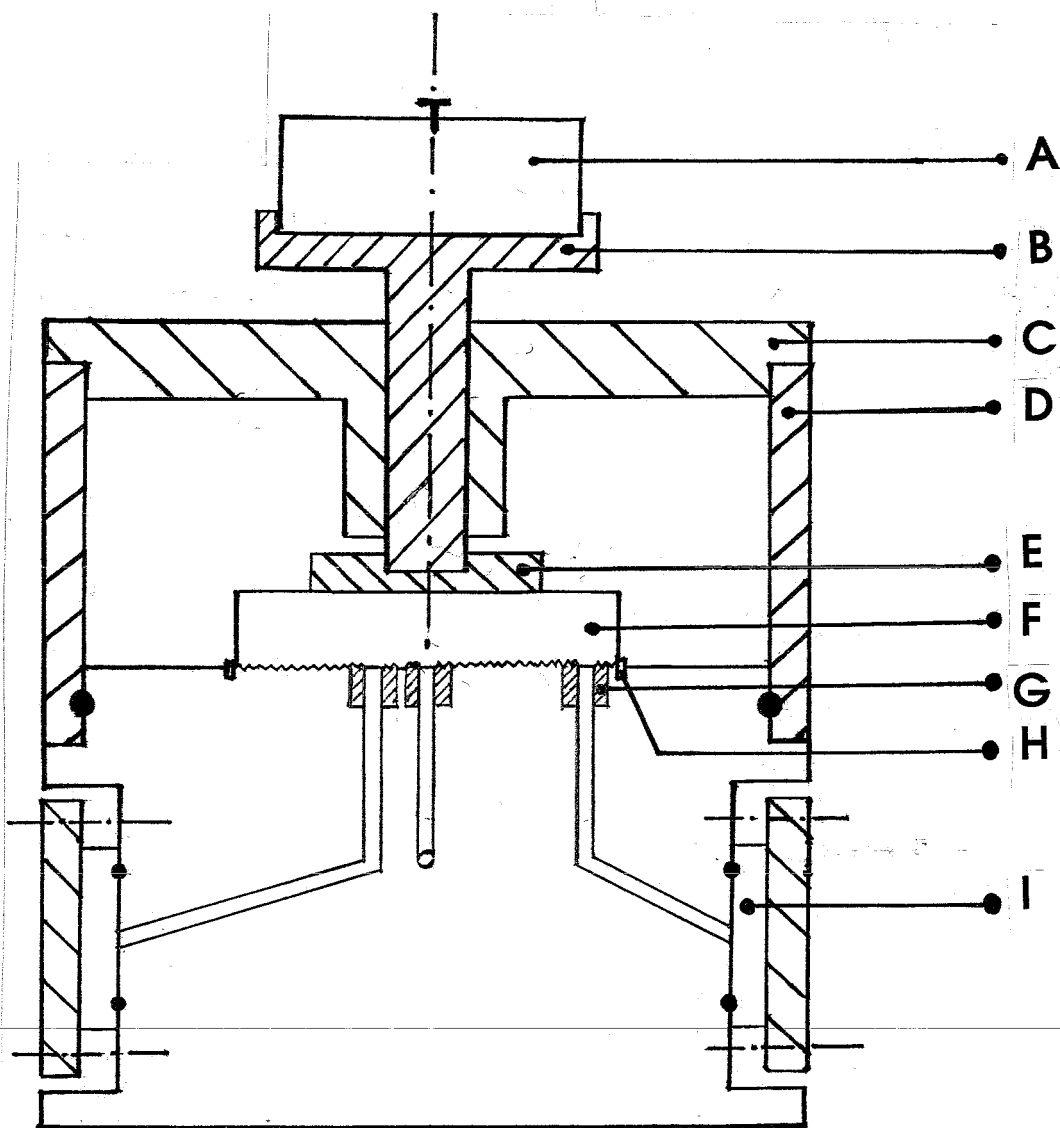
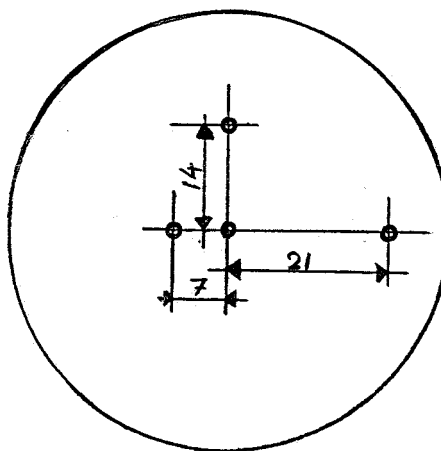
1. De meetsectie moet ontlucht kunnen worden. Dit betekent een beperking van de afmetingen, zodat de meetsectie in de vacuüm klok past.

2. De optredende drukken zullen maximaal $10 \cdot 10^{-3} \text{ N/mm}^2$ ($=0.1 \text{ bar}$) zijn (veiligheidsmarge van ≈ 1.6 t.o.v. de maximale druk bij $d_{st}=10 \text{ mm}$).
3. De drukverschilcompensatie door vloeistofverplaatsing mag alleen plaatsvinden door verplaatsing van water door het matrixmateriaal en niet langs de onderkant van de schijf.
4. Het aanbrengen van de kracht moet centrisch (midden op de schijf) gebeuren. Daarvoor is een een of andere centreerconstructie nodig voor de stempel en moet de schijf zich precies in het midden op de bodem van de meetsectie bevinden en daar ook blijven.
5. De kracht moet kunnen worden aangebracht met een stempel met veranderlijke diameter ($d_{st}=10$ en $d_{st}=30$). De aanpassing van de stempeldiameter dient eenvoudig te kunnen geschieden.
6. De meetsectie moet kunnen worden afgesloten met een deksel, waarin een klein gat zit. Via dit gat moet een bekende druk middels een kwikkolom kunnen worden aangebracht, waarmee de drukmeters te ijken zijn.
7. De meetsectie moet doorzichtig zijn, zodat zowel het proces als ook eventuele luchtballen in het water zijn waar te nemen.

Dit leidde tot de volgende ontwerpschets van de meetsectie (figuur 7):

- A: Gewicht
- B: Stang met schaalte
- C: Deksel met centreercilinder
- D: Cilinder
- E: Huls met $d=30$ mm
- F: Poreuze schijf
- G: Busje
- H: Centreerring
- I: Drukopnemer

Ligging van de drukmeetpunten:



figuur 7: de ontwerpschets

Bij deze ontwerpschets zijn nog enkele opmerkingen te plaatsen:

- De meetsectie bestaat uit een vierkant onderstuk, waarop een cilinder (D) is geplaatst. Beide zijn gemaakt van perspex.
- Er is bij het ontwerp uitgegaan van een homogene schijf. De opstelling is axisymmetrisch, zodat de drukmeetpunten zich op een willekeurige plaats t.o.v. het midden van de schijf ($r=0$) mogen bevinden. Rondom de drukmeetpunten worden busjes gemonteerd, met centrische ribbels bovenop, ter voorkoming van onderwaartse vloeistofverplaatsing. De gaten in de bodem bij de drukmeetpunten hebben een diameter van 2 mm. Er is gekozen voor een evenredige afstand tussen opeenvolgende drukmeetpunten. Deze liggen bij $r=0$, $r=7$, $r=14$ mm en $r=21$ mm.
- De drukopnemers zijn van het type Philips KPZ20G. Deze drukopnemers zijn geschikt voor een breed assortiment van vloeistoffen en gassen en voor een relatief laag drukniveau (-1 tot 2 bar).
- De stempel wordt gecentreerd middels een centreerconstructie die bestaat uit een deksel met centreercilinder (C) en een stang (B), die aan de bovenkant een schaalte heeft en vrijwel wrijvingsloos door de cilinder kan glijden. De kracht wordt aangebracht door een gewicht in het schaalte te laten vallen. Ook kan dit gebeuren door het schaalte waarin zich het gewicht reeds bevindt, met een pen via hefboomwerking (pen rust op buitenkant deksel) op te tillen en dan de pen weg te trekken. De massa van de perspex stang wordt bij deze laatste mogelijkheid tot het aanbrengen van de kracht verwaarloosd.
Het aanbrengen van de kracht gebeurt dus nog op een vrij primitieve manier, maar met het doel van deze stage voor ogen kan hiermee vooralsnog worden volstaan.
- De drukverschilcompensatie door onderwaartse vloeistofverplaatsing is bemoeilijkt, door scherpe centrische ribbels (maximale hoogte 0.5 mm) op de bodem van de meetsectie.
- De stang (B) heeft een diameter van 10 mm en er kan, om de diameter te vergroten tot 30 mm, aan de onderkant een huls (E) met $d=30$ mm omheen worden gemonteerd.
- Tevens is er een deksel met een gat van 4 mm gemaakt. Hiermee is de cilinder goed af te sluiten, omdat er een o-ring zit tussen deksel en buitencilinder van de meetsectie. Met deze deksel kan de ijking van de drukopnemers worden uitgevoerd. Daartoe wordt een kwikkolom via een slangetje, dat goed afsluit in het gat van de deksel, verbonden met de afgesloten cilinder.

3.3.2 Het MCA100-meetinstrument

De drukopnemers zullen gevoed moeten worden met een bronspanning. Dan geven ze, als functie van de indrukking van het inwendige membraan (dus als functie van de druk op dat membraan), een veranderlijke uitgangsspanning af. Hiervoor is het in het WFW-lab aanwezige Peekel-MCA100 meetinstrument uiterst geschikt.

Van dit apparaat zijn 4 in-/uitgangskanalen aangesloten op de 4 drukopnemers. Via deze kanalen levert de MCA100 een bronspanning van 5 V naar elke drukopnemer en ontvangt van elke drukopnemer een uitgangsspanning terug, die rechtevenredig is met het drukverloop. De uitgangssignalen zijn op een digitaal display zichtbaar te maken en worden rechtstreeks doorgegeven naar de analoog digitaal converter.

Ook wordt de ijking van de drukopnemers met de MCA100 uitgevoerd (zie 4.2.).

3.3.3 ASYST

Met het programma ASYST zijn de drukverlopen in de vorm van grafieken op het scherm te zien. Verder bezit ASYST de mogelijkheid om het ingangssignaal te triggeren. Dit houdt in dat pas als het ingangssignaal een vooraf ingestelde waarde overschrijdt, het signaal wordt vastgelegd. Zo kan het startsein van de metingen worden opgegeven. Tevens kan een bepaalde pre-trigger worden ingesteld, waarmee het signaal vlak voordat triggerwaarde wordt overschreden wordt onthouden en vóór de vastgelegde grafiek wordt geplakt.

Gemeten data kunnen worden opgeslagen in ASYST-files, in de vorm van kolommen met getallen. Deze files zijn binnen ASYST te converteren naar Matlab-files. Resultaat hiervan is, per meting, een Matlab-file met de drukverlopen bij $r=0$, $r=7$, $r=14$ en $r=21$ opgeslagen in kolommen. Met Matlab zijn uiteindelijk op een eenvoudige manier grafieken te maken.

Aldus kunnen op twee manieren drukverlopen worden gevisualiseerd: met behulp van ASYST kunnen grafieken op een computerscherm zichtbaar worden gemaakt en m.b.v. Matlab zijn plotjes op papier te maken.

4. EXPERIMENTEN

4.1. Inleiding

Als hoogte van de schijf wordt 10 mm genomen. Met het huidige productieproces (mengsel in een mal spuiten en laten stollen) is het bij deze hoogte niet mogelijk om een homogene schijf te maken met een grotere diameter dan 50 mm. Bij het stollen ontstaan anders gaten op willekeurige plaats in het materiaal die de schijf onbruikbaar maken. Daarom wordt gekozen voor een schijf met een diameter van 50 mm.

Alvorens de metingen uit te voeren zullen de drukopnemers geijkt moeten worden (4.2.). Vervolgens zal er een meetprotocol worden opgesteld (4.3.) en worden mogelijk optredende praktische onnauwkeurigheden opgesomd (4.4). Daarna worden de instellingen van ASYST behandeld (4.5) en kunnen tenslotte de metingen worden uitgevoerd (4.6).

4.2. Het ijken van de drukopnemers

Bij het ijken van de drukopnemers wordt gebruik gemaakt van een kwikkolom en het speciaal hiervoor gemaakte deksel (zie 3.3.1; blz. 15). Nadat de meetsectie in de vacuüm klok ontluicht is, wordt de speciale deksel op de cilinder geplaatst. Dan wordt de afgesloten cilinder via een slangetje met een kraantje verbonden met de kwikkolom. Als het kraantje open is, is de meetsectie verbonden met de atmosfeer. Als het kraantje gesloten is, zal in de cilinder dezelfde druk heersen als in de kwikkolom en kan deze worden voorgeschreven.

Het eigenlijke ijken kan nu beginnen. De 4 ingangskanalen van de MCA100 zijn afzonderlijk te calibreren. Eerst wordt de afgesloten cilinder verbonden met de buitenwereld (atmosferische druk) door het kraantje te openen. De calibratievensters van de 4 ingangskanalen worden dan op 0 mV geschaald. Dan wordt het kraantje gesloten en de druk in de kwikkolom opgevoerd tot 3 kPa ($= 3 \cdot 10^{-3} \text{ N/mm}^2$) en daarna constant gehouden. Door de uitslag op het calibratievenster van deze 4 ingangskanalen te schalen op 3000 mV is de ijking en calibratie voltooid. Resultaat hiervan is dat een uitgangssignaal van een drukopnemer van 1000 mV overeenkomt met 1 kPa ($= 1 \cdot 10^{-3} \text{ N/mm}^2$).

4.3. Het meetprotocol

De verschillende metingen moeten onder gelijke condities uitgevoerd worden. Zowel de manier van krachtaanbrengen, als de toestand waarin de schijf zich aan het begin van een meting bevindt, dienen per meting onveranderd te zijn. Daarom wordt het volgende meetprotocol opgesteld:

1. Zet de meetsectie, gevuld met water maar zonder schijf, in de vacuüm klok, zodat de luchtballen uit de leidingen kunnen worden gezogen.
 2. Zet de meetsectie met schijf in de vacuümpomp. Hierdoor wordt de schijf ontlucht en is de meetsectie met schijf in de juiste toestand om met de metingen te beginnen.
 3. Sluit de drukopnemers aan op 4 ingangen van het MCA100-meetinstrument.
 4. Voer de ijking uit.
 5. Verwissel de deksel, die bij het ijken is gebruikt, met de centreerconstructie.
 6. a) Mogelijkheid 1: Zet de stang met het schaalte waar het gewicht in komt te zitten op de schijf.
b) Mogelijkheid 2: Zet het gewicht in het schaalte en houdt de stang d.m.v. een pen net boven de schijf.
 7. Wacht tot de schijf zich in evenwichtstoestand bevindt. Dus wacht totdat de drukverhogingen die ontstaan door het plaatsen van de stang (bij de eerste meting volgens mogelijkheid a) of door het weghalen van gewicht, met (b) of zonder stang (a), van de schijf (vanaf de tweede meting) zijn verdwenen. Draai dan de uitslag van alle 4 de ingangssignalen van het MCA100-meetinstrument naar 0 mV, voor zover dat met de hand mogelijk is (onnauwkeurigheid ± 10 mV).
 8. Initieer het reeds ingestelde ASYST-programma (zie 4.5.) d.m.v. de ENTER-toets.
 9. Breng de belasting aan:
 - a: Laat de massa aan een touwtje in het schaalte zakken, of
 - b: Trek de pen weg.
 10. Verwerk, als er een representatieve meting is uitgevoerd, de data.
 11. a: Neem het gewicht van het schaalte, of
b: Zet de pen weer onder het schaalte en til daarmee de stang en het gewicht op.
-
12. Herhaal dit protocol vanaf punt 7 voor elke volgende meting.

4.4. Onnauwkeurigheden

Onnauwkeurigheden die tijdens ijking en meting kunnen optreden zijn:

1. Aflezen van de precieze druk in de kwikkolom (± 100 mV) tijdens ijking.
2. Tijdens de meting verandert de nulstand van het afleesvenster iets (± 20 mV).
3. De gevoeligheid van het MCA100-meetinstrument is zo groot, dat het moeilijk is om met de hand de uitslag van een signaal op het afleesvenster precies naar 0 mV te draaien (± 10 mV; zie punt 7 van het meetprotocol in 4.3.).
4. Onnauwkeurigheid van de drukopnemers.
5. Veranderende atmosferische druk (± 20 mV).

Punt 5 van deze onnauwkeurigheden is te ondervangen door opnieuw te ijken, als de atmosferische omstandigheden zijn gewijzigd t.o.v. die bij de vorige ijking.

4.5. Instellen van het ASYST-programma

Met het programma ASYST kunnen het trigger-niveau en-signaal, het aantal samples en de samplefrequentie worden ingesteld. De instelling bij $d_{st}=10$ en $d_{st}=30$ mm is verschillend.

4.5.1 Instelling van ASYST bij $d_{st}=30$ mm

Proefmetingen geven aan dat de druk na ongeveer een halve seconde is uitgedempt. Daarom wordt het aantal samples op 1000 en de samplefrequentie op 1 kHz gezet, zodat de 4 signalen over een tijdspanne van 1 sec iedere microseconde worden vastgelegd. Verder is signaal 1 ($r=0$) als triggersignaal gekozen. Pas als dit signaal een steigende flank kent die het 0.55 Volt-niveau (triggerniveau) bereikt, start het vastleggen van de 4 signalen. De pre-trigger bedraagt 10 % (= 0.1 sec).

4.5.2 Instelling van ASYST bij $d_{st}=10$ mm

De verwachting is dat de vloeistofdrukken sneller zullen uitdempen. Na het doen van enkele proefmetingen blijkt een verhoging van de samplefrequentie tot 2 kHz voldoende te zijn om de signalen, bij gelijkblijvend aantal samples (1000) mooi vast te leggen. Dit vastleggen geschiedt dus iedere halve microseconde over een tijdspanne van 0.5 sec. Ook hierbij is signaal 1 het triggersignaal, waarbij het trigger-niveau op 4 V ligt. De pre-trigger is wederom 10 % (= 0.05 sec).

4.6. Metingen en verwerking van de meetresultaten

Er zijn 16 metingen uitgevoerd met een stempeldiameter van 30 mm en 10 metingen met een stempeldiameter van 10 mm. De vorm van de grafieken en de maximale waardes van de druk

zijn sterk afhankelijk van de snelheid waarmee de belasting wordt aangebracht. Wel is het totale oppervlakte onder de grafiek per stempeldiameter, per meting en per drukmeetpunt veelal gelijk.

Bij $d_{st}=30$ mm is de kracht aangebracht volgens mogelijkheid a uit het meetprotocol en bij $d_{st}=10$ mm volgens mogelijkheid b. Het bleek dat het gebruik van mogelijkheid b tot minder ongewenste slingeringen in de grafieken leidde dan mogelijkheid a. Deze ongewenste slingeringen ontstonden vooral doordat het met de hand vrijwel onmogelijk is om het gewicht perfect horizontaal op het schaalte te leggen. Om de ongewenste slingeringen te verwijderen werden de resultaten van alle metingen gemiddeld. Dit middelen is op twee manieren uitgevoerd:

1. Gebruik de trigger van de ASYST-instelling

Hierbij worden eenvoudig de grafieken van alle metingen opgeteld en gedeeld door het aantal metingen.

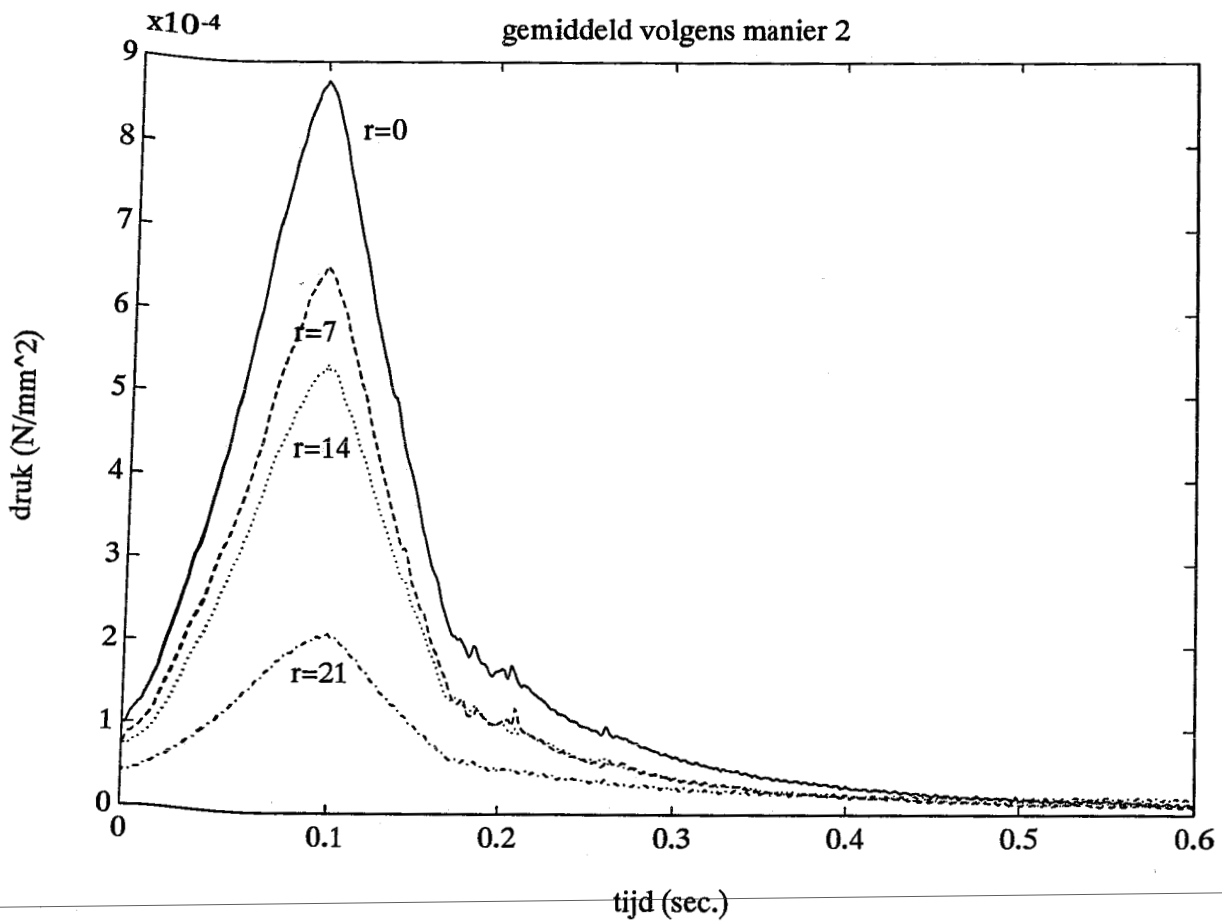
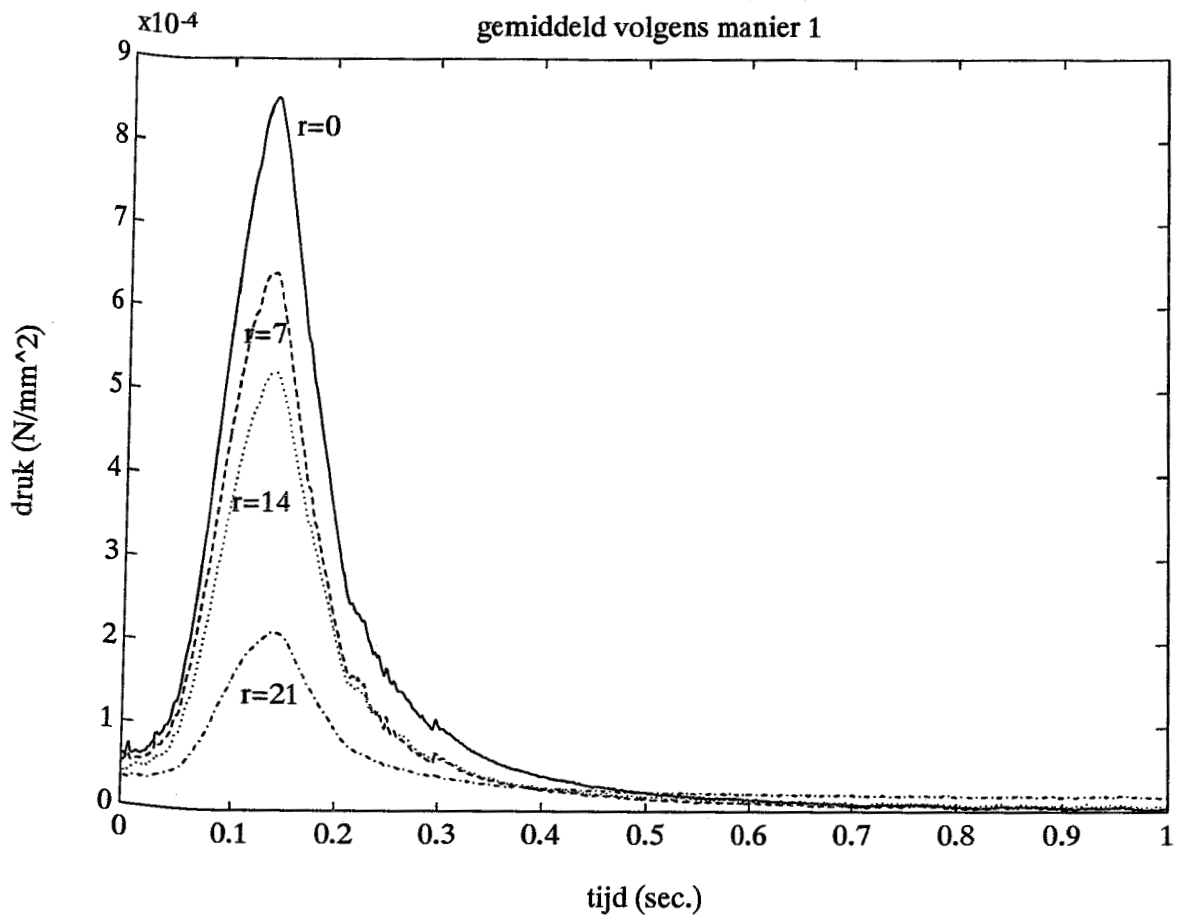
Dit wordt uitgevoerd binnen ASYSTANT-software, door de kolommen met getallen van de verschillende metingen, per drukmeetpunt ($r=0$, $r=7$, $r=14$ en $r=21$) op te tellen en te delen door 16 respectievelijk 10. Plotjes van de gemiddelde waarden worden in Matlab gemaakt.

2. Trigger naar het maximum

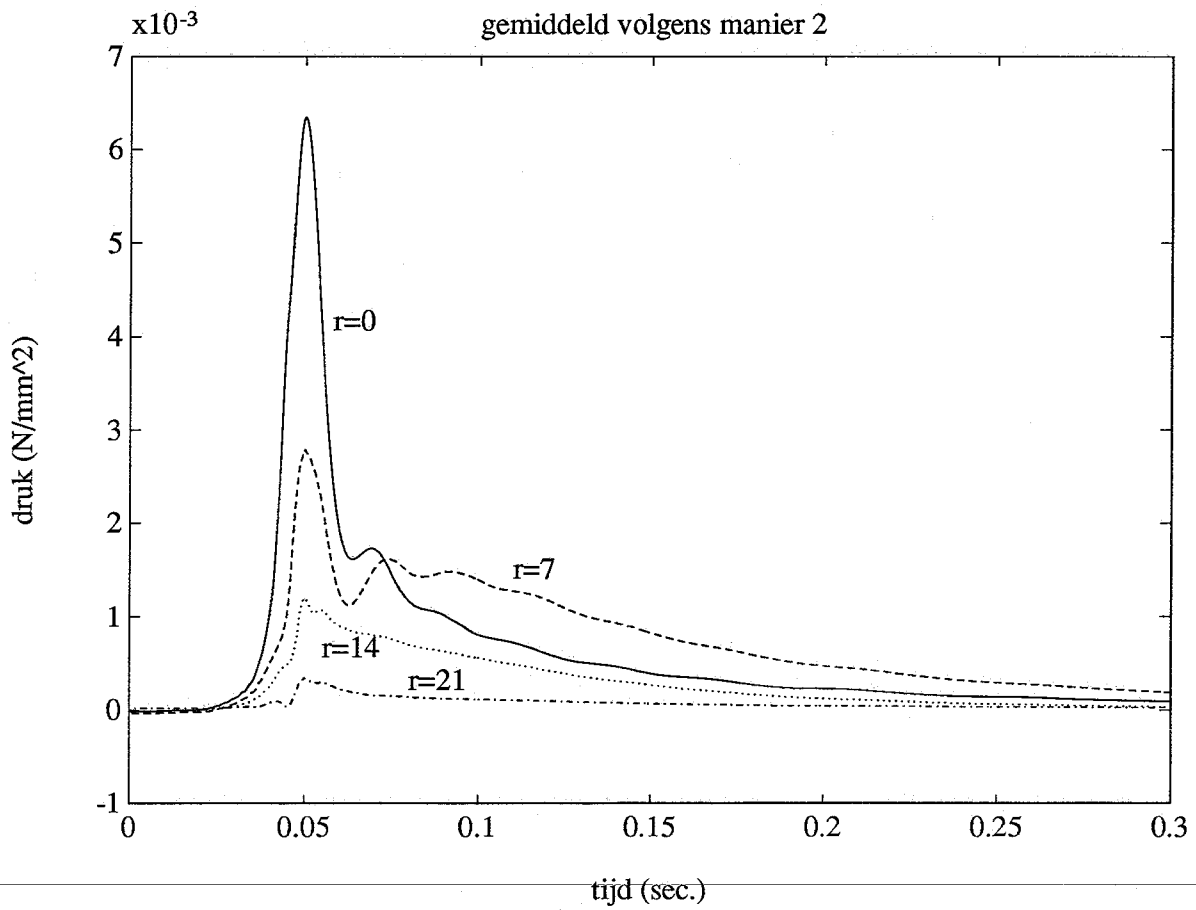
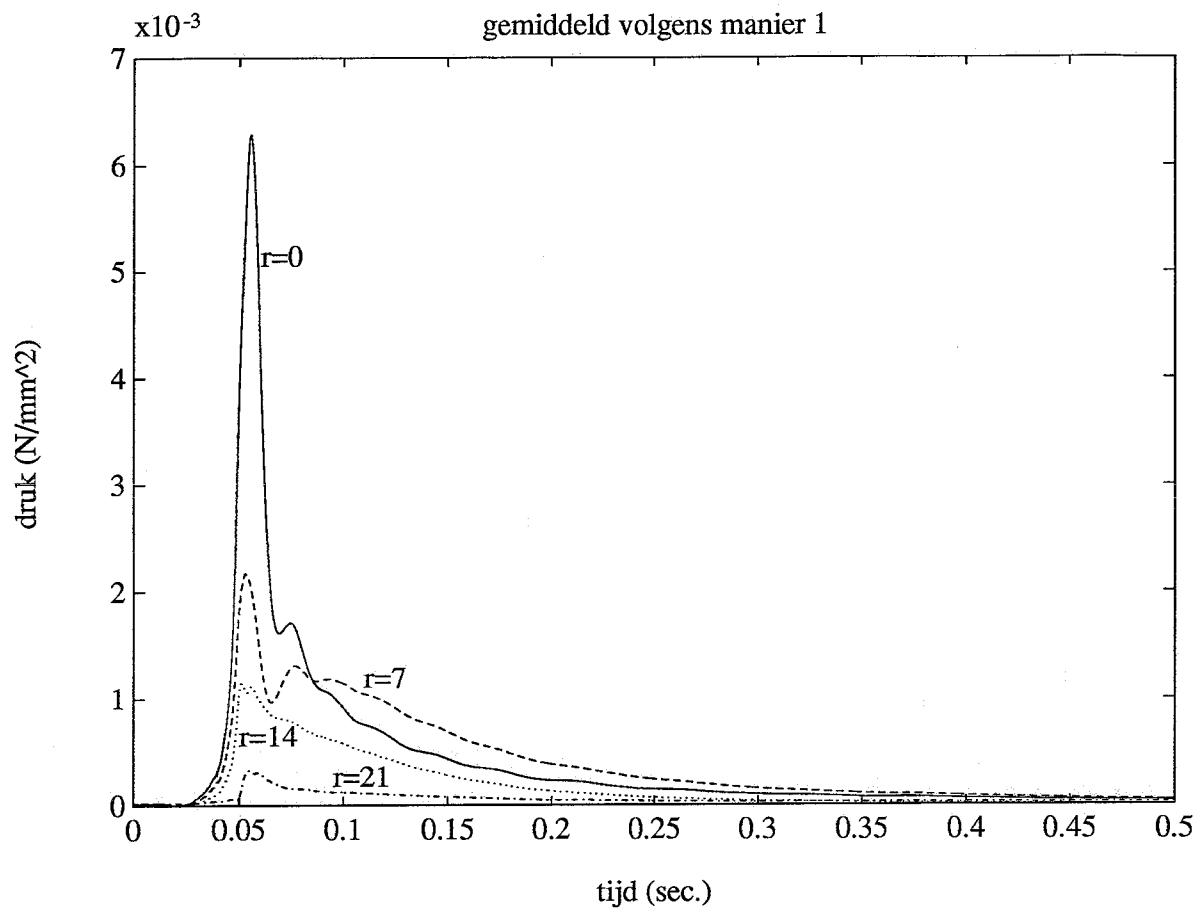
Hiervoor wordt een Matlab-programma geschreven dat het maximum van een kolom met getallen opzoekt en vervolgens 100 getallen links en 500 getallen rechts van dat maximum in een nieuwe kolom stopt. Deze nieuwe kolommen worden vervolgens weer per drukmeetpunt opgeteld en gedeeld door het aantal metingen.

Zo worden er 4 grafieken gemaakt; voor zowel $d_{st}=30$ als voor $d_{st}=10$ mm worden de metingen gemiddeld volgens de hierboven uitgelegde manieren. Na middeling blijken er kwalitatief mooie grafieken te ontstaan. Ze zijn in figuur 9 en figuur 10 op de volgende twee bladzijden afgebeeld.

De maximale waarden, per drukmeetpunt, van de 2 gemiddelde grafieken verschillen voor zowel $d_{st}=10$ als $d_{st}=30$ mm niet veel van elkaar. Hierdoor kan geconcludeerd worden dat de maximale druk bij iedere afzonderlijke meting per drukmeetpunt op ongeveer hetzelfde tijdstip ontstond. Alleen voor $d_{st}=10$ bij $r=7$ is er een groter verschil in maximale waarde van de druk van de twee gemiddelde grafieken.



figuur 9: *druk* in de drukmeetpunten als functie van de tijd voor $d_{st}=30 \text{ mm}$



figuur 10: druk in de drukmeetpunten als functie van de tijd voor $d_{st}=10$ mm

5. VERGELIJKING VAN NUMERIEKE MET EXPERIMENTELE RESULTATEN

5.1. Vergelijking van het experiment met het numerieke model

Als de resultaten van het experiment (figuur 9 en 10) met de numerieke uitvoer (figuur 6) worden vergeleken, ziet men de volgende overeenkomsten:

- De druk in het midden ($r=0$) heeft altijd de grootste maximale waarde en de druk aan de buitenkant ($r=21$) kent altijd de laagste maximale waarde.
- Nadat de druk een maximale waarde heeft bereikt, neemt hij bij een kleine stempeldiameter sneller af dan bij een grote. Ook wordt die maximale waarde eerder bereikt.
- Naarmate het drukmeetpunt verder van $r=0$ mm verwijderd ligt, wordt eerder de maximale druk bereikt. Dit is experimenteel slechts nauwelijks (kleinere tijden) waar te nemen.
- De maximale waarde van de druk bij $d_{st}=10$ mm verschillen experimenteel en numeriek nauwelijks voor $r=0$ en $r=14$ mm.
- Het quotiënt (P_{max} bij $d_{st}=10$ mm)/(P_{max} bij $d_{st}=30$ mm) is voor $r=7$ mm en $r=21$ mm ongeveer gelijk.
- De relatieve maximale druk (maximale druk van de overige meetpunten t.o.v. de maximale druk bij $r=0$) levert experimenteel en numeriek eenzelfde verschijnsel op. Deze ligt bij een grote stempeldiameter bij beiden voor $r=7$ en $r=14$ op een hoger niveau dan bij een kleine stempeldiameter. Oorzaak hiervan is de ligging van de drukmeetpunten t.o.v. de stempeldiameter. Deze liggen daar binnen bij $d_{st}=30$ mm en er buiten bij $d_{st}=10$ mm.

Echter, er zijn ook duidelijke verschillen waar te nemen:

- De druk bij zowel de grote als bij kleine stempeldiameter dempt experimenteel sneller uit dan de numerieke verwachting.
- Het hierboven gedefinieerde quotiënt is voor $r=0$ mm en $r=14$ mm numeriek bepaald kleiner dan experimenteel.
- Voor $d_{st}=10$ mm en $r=7$ en 21 mm is de maximale waarde van de druk experimenteel kleiner dan numeriek. Dit is bij $d_{st}=30$ mm voor alle drukmeetpunten het geval.

- De vormen van de experimenteel en numeriek bepaalde grafieken zijn, vooral aan het begin, anders.
- De experimentele grafiek van het drukverloop van $r = 7$ mm bij $d_{st} = 10$ mm maakt tijdens het uitdempen een behoorlijke slinger. Ook doorkruist deze grafiek, ten tijde van uitdemping, de experimentele grafiek van het drukverloop van $r = 0$ mm. Deze twee verschijnselen zijn in de numerieke grafieken niet waar te nemen. Waarschijnlijk worden ze veroorzaakt door de ligging van de drukmeetpunten t.o.v. de stempel. Bij $d_{st} = 10$ mm ligt $r = 0$ natuurlijk onder de stempel, maar ligt $r = 7$ mm net buiten de stempeldiameter. Het is waarschijnlijk dat het overbodige water dat zich onder de stempel bevindt, sneller door de stempel wordt weggeperst dan het overbodige water dat zich in de rest van het matrixmateriaal bevindt, zodat de druk bij $r = 0$ mm sneller uitdempt dan bij $r = 7$ mm. Hiermee is het doorkruisen van de grafieken verklaard, maar het optreden van de slinger nog niet.

5.2. Mogelijke oorzaken van nog niet verklaarde verschillen

Een aantal verschillen zoals die bij 5.1. zijn opgesomd, zijn nog niet verklaard. Met de volgende redeneringen wordt gepoogd dit alsnog te doen:

- De E-modulus en de permeabiliteit K waren gebaseerd op vergelijkbaar materiaal, maar hoeven niet hetzelfde te zijn. Zeker de permeabiliteit zal in werkelijkheid veel hoger liggen dan de veronderstelde.
- Het kan zijn dat de schijf niet helemaal homogeen is, vooral qua permeabiliteit. Het is namelijk niet uitgesloten dat tijdens de stolling van het matrixmateriaal, op de ene plaats grotere gaatjes in dat matrixmateriaal zijn ontstaan dan op een andere plaats.
- De starre, niet-poreuze stempel is numeriek gemodelleerd door boven op de schijf in het midden (dus in het knooppunt linksboven van figuur 7), een kracht op te leggen en de verplaatsingen van de knooppunten op de bovenste rij die binnen de stempelstraal liggen, in y -richting te koppelen. Wanneer deze knooppunten een zijdelingse verplaatsing ondergaan wordt de modellering van de stempel onwerkelijk. De gemodelleerde stempeldiameter verandert dan namelijk van grootte. Een oplossing kan het gebruik van contactelementen zijn.
- Bij de numerieke berekening is, als randvoorwaarde voor de belasting, een curve in de vorm van een stapfunctie voorgeschreven (zie 2.4.; figuur 5). Experimenteel wordt de belasting opgelegd d.m.v. het gewichtje. Daarmee is een stapfunctie slechts te benaderen, omdat een

sprong in de belasting, die bij een stapfunctie optreedt, niet exact te verwezenlijken is. Er zal altijd sprake zijn van een hellingshoek bij het opleggen van de belasting. Resultaat hiervan is dat de vorm van de drukverloop-grafieken in het begin (bij het opleggen van de belasting) nogal verschillen.

Een tweede gevolg van de experimentele hellingshoek zou moeten zijn dat de experimentele waarden van de maximale druk kleiner zijn dan de numeriek bepaalde. Er kan bij het opleggen van de belasting namelijk al vloeistof weglekken voordat de maximale belastingpiek wordt bereikt. Dit is niet waar te nemen bij $d_{st} = 10$ mm voor de drukmeetpunten $r = 0$ en $r = 14$ mm. Mogelijk dat daar het (verwaarloosde) gewicht van de perspex stang met het schaalpje een rol speelt, omdat bij het aanbrengen van de belasting bij een stempeldiameter van 10 mm gebruik is gemaakt van mogelijkheid b) uit het meetprotocol (zie 4.3).

6. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1. Conclusies

Allereerst een hoofdconclusie:

De tijdens deze stage ontworpen meetsectie is in staat om, opgenomen in een meetopstelling, de druk onder een in een vloeistof gedompelde poreuze schijf op 4 plaatsen te meten als functie van de tijd. Met de verkregen resultaten kan een analyse van de drukverschillen over de straal van de schijf worden uitgevoerd.

Verder komt het gemeten resultaat al redelijk overeen met de numerieke analyse, ondanks de primitieve manier van belastingaanbrengen en het gebruik van materiaalparameters bij de numerieke analyse die afkomstig zijn van metingen aan andere proefstukken.

De eerste aanzet tot experimentele validatie van een numeriek kniemodel is hiermee tot stand gebracht.

6.2. Aanbevelingen

Tot slot nog een aantal aanbevelingen:

- Voer numerieke berekeningen uit met materiaalparameters die afkomstig zijn van metingen aan proefstukken, waarmee de experimenten werkelijk worden uitgevoerd. Gebruik contactelementen voor het numeriek aanbrengen van de belasting en houd rekening met het gewicht van de perspex stang met schaalte, indien nodig. Geef de belastingcurve een hellingshoek i.p.v. een sprong.
- Draai de schijf een kwartslag en voer nogmaals de experimentele metingen uit. Aan de hand van de dan verkregen resultaten, kan worden nagegaan in hoeverre de materiaaleigenschappen van de schijf rotatie-symmetrisch zijn.
- Breng de permeabiliteit omlaag, zodat de meettijden langer worden.
- Verbeter de primitieve dataverwerking.

LITERATUUR

- [1] Borst, R. de, et al.
"DIANA- A comprehensive, but flexible finite element system",
in "Finite element systems, a handbook", ed.
C.A. Brebbia, Springer Verlag, 1985.

 - [2] Heus, H. de, et al.
Model materials for validation of mathematical
models describing biological tissue behaviour.
Proceedings to be published of a conference on
computational and experimental methods in biomechanics,
Swansea, april 1992.

 - [3] Lankveld, M. van.
Mengsels en contact, een literatuurverslag.
TUE, WFW rapport 90.017, 1990.

 - [4] Oomens, C.
Constitutieve modellen.
Collegedictaat 4687, trimester 2.3, TUE.

 - [5] Schreppers, G.J.
Force transmission in the tibio-femoral contact complex.
Proefschrift TUE, juni 1992.
-

BIJLAGEN**BIJLAGE 1. NUMERIEKE PROGRAMMATUUR****Bijlage 1A. Meshgeneratie-programma's****mesh.dat**

```
'mesh'
```

```
vertices di=2
```

```
 1  0.0  0.0  
 2 25.0  0.0  
 3 25.0 10.0  
 4  0.0 10.0
```

```
diagram
```

```
topolo
```

```
1 2
```

```
4 3
```

```
division
```

```
x 0.5(40) 1 1.75 2.25 /
```

```
y 1.0(10) /
```

```
elemen q8axi
```

```
'end'
```

mesh.com

```
*filos
```

```
initia
```

```
*mesh
```

```
genera
```

```
end genera
```

```
input fi="schijf2.dat"
```

```
*end
```

```
*end
```

Bijlage 1B. Invoerprogramma schd10.dat voor $d_{st} = 10$ mm.

NUMERIEKE ANALYSE VAN EEN POREUZE SCHIJF

'COORDI' DI=2

1 0.00000E+00 0.00000E+00

2 5.00000E-01 0.00000E+00

....

.... (Hier staan de knooppuntnummers en -ligging)

'ELEMEN'

CONNEC

1 Q8AXI 1 2 46 45

2 Q8AXI 2 3 47 46

....

.... (Hier staan de elementnummers, het soort element en de topologie)

MATERI

/ 1-430 / 1

GEOMET

/ 1-430 / 1

data

/ 1-430 / 1

'data'

1 mixtur

'MATERIALS'

1 YOUNG 1.75

POISON 0.2

PERMEA 10.

'GEOMETRY'

1 XAXIS 1. 0. 0.

'DIRECTIONS'

1 1. 0. 0.

2 0. 1. 0.

'TYINGS'

EQUAL TR 2

/ 442-451 / 441

'SUPPORTS'

```
/ 1-441(44), 44 / TR 1  
/ 1-44 / TR 2  
/ 452-484, 44-440(44) / PR  
'LOADS'  
CASE 1  
NODAL  
441 FORCE 2 -1.374  
'END'
```

Bijlage 1C. Rekenprogramma schd10.com voor $d_s = 10$ mm.

```
*filos
  initia ma=1000000
*input
*elasse
  store.x
*elmat
*loads
*order
*nonlin
initialize
  analys geomet dynamic
  option tangen nonsym
use
  nomass
  dampin.t
  backwd
end use
end initia
loadin
  load(1): (1) 1.0 /
  time 0.0:1.0   load(1) 0.0:0.0
  time 1.0:100.0 load(1) 1.0:1.0
end loadin
select
  nodes 1-41(2),42,44 /
  elemen 10-397(43) /
  intpnt all /
  nodes all /
  end elemen
end select
output print
  displa total
  presno total
  strain
```

```
end output
execute time steps
size 1. (1) 0.02 (3) 0.08 (3) 0.15 (3) 0.4 (6) 0.8 (7) /
perfor newton regula MI=10
norm refere energy
norm check energy EP=0.0001
end execute steps
*end
*end
```