

Het effect van wrijvingsreductie methoden in de Triaxiale Cyclische Drukproef op Asfalt (weerstand tegen permanente vervorming)

EN 12697-25:2005 versus EN 12697-25:2016, Method B: triaxial Cyclic Compression

Erkens, S.M.J.G.; Poot, M.R.; Khadijeh, M.

Publication date

2023

Document Version

Final published version

Citation (APA)

Erkens, S. M. J. G., Poot, M. R., & Khadijeh, M. (2023). *Het effect van wrijvingsreductie methoden in de Triaxiale Cyclische Drukproef op Asfalt (weerstand tegen permanente vervorming): EN 12697-25:2005 versus EN 12697-25:2016, Method B: triaxial Cyclic Compression*. Delft University of Technology.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Prof.dr.ir. S.M.J.G. Erkens, ing. M.R. Poot en Msc. M. Khadijeh

Het effect van wrijvingsreductie methoden in de Triaxiale Cyclische Drukproef op Asfalt (weerstand tegen permanente vervorming)

EN 12697-25:2005 versus EN 12697-25:2016, Method B: triaxial Cyclic Compression

Report 7-22-214-2

Pavement Engineering Section
Delft University of Technology

V3.1: Augustus 2023

Colofon

Gepubliceerd door:

Pavement Engineering
Department of Engineering Structures,
Civil Engineering and Geo science,
Delft University of Technology

Informatie

Pavement Engineering Secretariat
Room SII 2.29, CiTG
Stevinweg 1, Delft
Telephone +31 (0)15 27 89699
Email: c.y.baltussen@tudelft.nl

Schrijvers

prof. Dr.ir. S.M.J.G. Erkens.....

Ing. M.R. Poot.....

Datum Augustus 2023

Status Final

Version 3.1, Augustus 2023

Klant: Rijkswaterstaat

Begeleidingsteam:

Ing. I. van Vilsteren.....
.....
.....

Copyright©2022

Provided that a clear reference to this publication is included and the results are not cited out of context, anything from this publication can be multiplied, saved in digital files and/or published by means of printing, photocopying or any other means, without prior written consent of the authors and/or the Pavement Engineering Group.

Liability

Although extreme care has been taken to ensure the quality of this publication, accept neither the Pavement Engineering group nor the authors any liability in case of omissions, errors or any effects thereof.. Us of this publication is the responsibility of the user. accept de inhoud van deze publicatie aanvaardt de groep Pavement Engineering, noch de auteurs van deze publicatie enige aansprakelijkheid voor onvolledigheid, onjuistheid of de gevolgen daarvan. Any Use of the contents of this publication is the responsibility of the user.

0 Samenvatting

In dit rapport wordt een onderzoek beschreven met vijf verschillende wrijvingsreductiesystemen. De aanleiding was een verandering in de EN 12697-25, waarbij Latex wrijvingsreductie vervangen is door Teflon, terwijl er flink wat onderzoek is dat liet zien dat Teflon voor asfalt minder effectief is dan Latex. Testen van hetzelfde asfalt met beide systemen leidde ertoe dat het materiaal in verschillende klassen werd geplaatst.

Eerdere onderzoeken keken óf naar radiale (tonvorming) óf naar axiale vervorming. In dit onderzoek wordt naar beide gekeken, met als doel de (zo uniform mogelijke) radiale vervorming te gebruiken voor een keuze in wrijvingsreductiesysteem. Hierbij wordt de radiale vervorming mede als functie van slankheid van het proefstuk beschouwd. De axiale vervorming wordt gebruikt om de relatie te leggen naar bekende resultaten van de triaxiaalonderzoek.

Om dit te bereiken zijn proefstukken van verschillende hoogtes en diameter 100 mm voorzien van negen rekstroken op drie verschillende hoogtes. Deze proefstukken zijn kort en bij lage belasting beproefd waarbij steeds verschillende wrijvingsreductie systemen zijn gebruikt: Geen, Latex, Teflon, Plastic folie en Plasticfolie op Teflon. Om het installeren van de verschillende wrijvingsreductiesystemen eenvoudig en consistent te houden, zijn de proeven uitgevoerd zonder steundruk en bij kamertemperatuur.

De resultaten waren verrassend, de radiale rekken op 5mm van de bovenkant van het proefstuk waren in alle gevallen anders dan verwacht. Op 10 mm boven het midden waren ze wel grotendeels conform verwachting. Hoewel het verleidelijk is om daarom te kijken naar de resultaten die wel conform verwachting zijn en er bij nadere analyse de rekken bij de plaat mogelijk beïnvloed worden door buiging van het proefstuk op die positie, is dit met de beschikbare data niet vast te stellen. Zeker omdat ook de axiale signalen voor een deel van de systemen af wijken van eerdere ervaringen, kan alleen worden vastgesteld dat de resultaten helaas geen nadere onderbouwing geven voor een keuze van wrijvingsreductiesysteem. Wel blijkt eens te meer dat de invloed van dit systeem aanzienlijk is en blijft een goede, robuuste en duidelijk omschreven keuze noodzakelijk.

Omdat de signalen verrassend zijn is het aan te bevelen een deel van metingen te herhalen, bij voorkeur met gebruik van een non-contacting systeem dat de gehele vervorming in kaart brengt voordat verder wordt gegaan op dit spoor. Aanvullend op dat vervolg, kunnen conventionele triaxiaalproeven met centraal vervaardigde proefstukken en een beperkt aantal, goed gedefinieerde, wrijvingsreductiesystemen door verschillende partijen worden uitgevoerd om veel en gevarieerde data te verzamelen. De analyse van deze data, eventueel parallel aan numeriek onderzoek, brengt de kennis van en het inzicht in wrijvingsreductie bij triaxiaalonderzoek verder richting een definitieve keuze voor het te gebruiken systeem.

1 Inhoudsopgave

Contents

0	Samenvatting.....	1
1	Inhoudsopgave	2
2	Aanleiding.....	4
2.1	Historisch overzicht wrijvingsreductie	6
2.2	Probleemstelling en onderzoeksvraag.....	14
2.2.1	onderzoeksvraag	14
2.2.2	Hypothesen	14
3	Onderzoeksplan.....	16
3.1	Onderzoeksopzet	16
3.2	Proefstukbereiding en instrumentatie.....	17
3.3	Procedure en wrijvingsreductie methoden	18
3.4	Referentiewaarde radiale rek	21
4	Test resultaten & discussie.....	22
4.1	Overzicht proeven en condities	22
4.2	Resultaten	22
4.2.1	H=30, geen wrijvingsreductie.....	22
4.2.2	H=30 met Latex	26
4.2.3	H30 met Teflon.....	28
4.2.4	H30 met Plasticfolie	30
4.2.5	H30 met Plasticfolie op Teflon	31
4.2.6	H=60, geen wrijvingsreductie.....	33
4.2.7	H=60 met Latex	35
4.2.8	H60 met Teflon.....	37
4.2.9	H60 met Plasticfolie	39
4.2.10	H60 met Plasticfolie op Teflon	41
4.2.11	H=80, geen wrijvingsreductie.....	43
4.2.12	H=80 met Latex	45
4.2.13	H80 met Teflon.....	47
4.2.14	H80 met Plasticfolie	50
4.2.15	H80 met Plasticfolie op Teflon	51
4.2.16	H=100, geen wrijvingsreductie.....	54
4.2.17	H=100 met Latex	55
4.2.18	H100 met Teflon.....	57
4.2.19	H100 met Plasticfolie	60

4.2.20	H100 met Plasticfolie op Teflon	62
4.3	Analyse en discussie.....	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
4.3.1	Resultaten per wrijvingsreductie systeem.....	71
5	Conclusies en Aanbevelingen	97
5.1.1	Fase 2	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
6	Referenties	102
7	Bijlage 1: proefstukgegevens	104

2 Aanleiding

In aanloop van een MSc studie aan de TU Delft in 2017 (Seleridis 2017) bleek, in de herziene norm van EN 12697-25 (versie 2005 versus 2016), de wrijvingsreductie methode gewijzigd. Het gaat hier om de Weerstand tegen Permanente Vervorming (Resistance to Permanent Deformation) in methode B van de triaxiale cyclische drukproef (Cyclic Triaxial Compression Test). In 2005 werd in de voetnoot van de norm het gebruik van een latex rubber membraan geadviseerd, terwijl in 2016 het gebruik van een Teflon (PTFE) vel als wrijvingsreducerende laag werd aanbevolen (Figuur 2.1).

NEN-EN 12697-25:2005
5.4.6 To minimize the friction between the loading platens and the test specimen, a membrane-lubricant-membrane-system shall be used between the loading platens and the specimen. NOTE 1 The membrane may e.g. consist of a disk cut out of typical geotechnical latex rubber membranes, e.g. ELE P/N EL-25-7621 or WFI P/N 11091 or equivalent, of the same diameter as the specimen. A small amount of silicon grease should be applied between both membranes. NOTE 2 The amount of friction between the loading platens and the specimen is known to have a large impact on the results. NOTE 3 Instead of putting the test specimen in direct contact to the loading platens, the specimen may be glued by its extremities on steel plates
NEN-EN 12697-25:2016
8.4.3 To minimize the friction between the upper and lower loading platens and the test specimen, the end faces of the test specimen shall be smooth and plain. Brush the hand over the test specimens' surface. If it feels even without blemishes, it shall be considered adequate, otherwise it shall be polished or ground. A friction reducing system shall be applied. The friction-reducing system shall consist of a circular disk cut out of a PTFE-sheet (e.g. Teflon or equivalent). The PTFE-sheet shall have a thickness of 0,5 mm and a shore hardness between D50 and D60. The diameter of the disk shall comply with the diameter of the loading platen. Other systems to reduce the friction between loading platen and test specimen surface may be applied if proven that the alternative systems reduces the friction in a similar extend as prescribed system and doesn't influence the axial strain measurement. NOTE The amount of friction between the loading platens and the test specimen is known to have a large impact on the results.

Figuur 2.1: De tekst uit EN 12697-25:2005 (boven) en 2016 (onder) over wrijvingsreductie

Uit onderzoek uit het verleden (Bolk (1980), Erkens and Poot (1998)) was bekend dat teflon voor asfalt, in tegenstelling tot beton, slecht werkt in het reduceren van wrijving, wat invloed kan hebben op de proefresultaten.

In het MSc project is daarom, naast een analyse van de standaard Type Test resultaten voor watergevoeligheid en weerstand tegen permanente vervorming op lab- versus praktijk-vervaardigde proefstukken, ook een summier onderzoek gedaan naar het effect van verschillende wrijvingsreductiemethoden op het resultaat van de weerstand tegen permanente vervorming. Hierbij zijn proeven conform de norm (EN12697-25) en de nadere invulling in proef 62 van de RAW-standaard 2015 gedaan, waarbij vier verschillende wrijvingsreductie systemen zijn gebruikt:

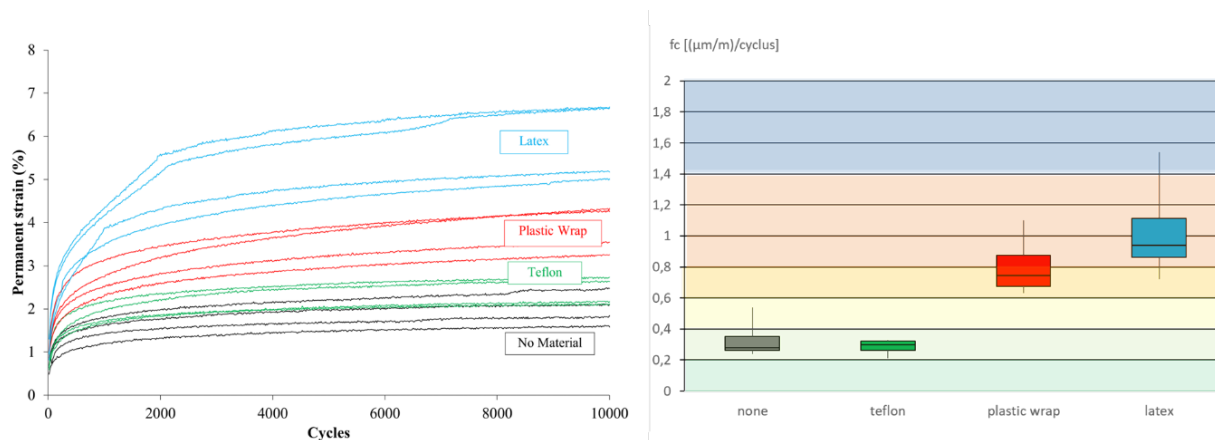
- Geen wrijvingsreductie (proefstuk "koud" op de metalen belastingplaat)
- Teflon (twee lagen teflon folie van 0,5 mm dikte aan beide zijden van het proefstuk, zonder materiaal ertussen omdat het gebruik van vacuüm vet de teflon lagen juist aan elkaar liet plakken)
- Twee lagen latex van 0,3 mm dikte (zelfde materiaal als het membraan gebruikt in de test: ELE International Rubber Membrane), met 1 gram vacuüm vet (Dow Corning® High Vacuum Grease) ertussen
- plastisch vervormbaar folie ("plastic wrap" Luflexen, BASf), in twee lagen met zachte zeep (Tricel® Goudzeep) ertussen

Tabel 2.1: Eigenschappen plastischvervormbaar folie (Luflexen © BASf, dd 1998, (Erkens 2002a))

Density	0.903	G/cm ³	ISO 1183
Fuse index (190°C, 2.16kg)	1.4	G/10min	ISO 1133
G	50	MPa	ISO 6721-2
E	75	MPa	ISO 527
Yield stress	7	MPa	ISO 527
Rupture resistance	32	MPa	ISO 527
Ultimate strain	650	%	ISO 527

De proefstukafmetingen bedroegen $h=60$ mm en $D=100$ mm. De resultaten zijn gereproduceerd in Figuur 2.4 (Seleridis 2017, Erkens, van Vliet et al. 2018) en Tabel 2.2. Deze resultaten laten het effect zien op de permanente vervorming en op de f_c . Uit de linker grafiek is te zien dat, hoewel er wat overlap is tussen de resultaten zonder wrijvingsreductie en met teflon, de initiële en uiteindelijke vervorming toenemen van geen wrijvingsreductie, via teflon en plastic naar latex. Dit komt terug in de f_c waarden. Voor de proeven met teflon is de f_c vergelijkbaar met die van geen wrijvingsreductie, voor plastic en latex liggen de waarden aanzienlijk hoger.

De achtergrond kleuren in de rechtergrafiek geven de eisen uit de RAW standaard aan. Hetzelfde asfalt getest met teflon als wrijvingsreductie voldoet aan de eis $f_c \leq 0,4$ $\mu\text{m}/\text{m}/\text{cyclus}$. Als er geen wrijvingsreductie wordt gebruikt voldoet het asfalt grofweg ook aan deze eis¹, maar wordt het plastic systeem gebruikt dan ligt de spoorvormingsgevoeligheid van hetzelfde asfalt op de grens van $f_c \leq 0,8$ $\mu\text{m}/\text{m}/\text{cyclus}$ en wordt latex als wrijvingsreductie systeem gebruikt dan voldoet het duidelijk niet aan die eis.

Figuur 2.2: Effect van verschillende vormen van wrijvingsreductie op de permanente rek (links) en de f_c (rechts)²

Tabel 2.2: resultaten vergelijkend wrijvingsreductieonderzoek (Seleridis 2017)

	geen	teflon	plastic wrap	latex
average	0,34	0,29	0,81	1,04
standard deviation	0,138	0,054	0,209	0,353

¹ De bulk van de resultaten voldoet, maar er is een waarde die hoger is. Omdat de f_c een maximum eis is, kun je er over discussiëren of dit voldoet of niet.

² De "boxplots" geven het minimum en maximum (einde van de lijnen), de grenzen waarbinnen 50% van de data valt (onder en bovenzijde "box") en de mediaan (lijn in de box). De data per wrijvingsreductiesysteem bestaan uit vier herhalingenwaarden en zijn gegeven in Tabel 2.2

min	0,24	0,21	0,63	0,72
Q1inc	0,2625	0,2625	0,675	0,8625
median	0,28	0,3	0,745	0,94
Q3inc	0,3525	0,3225	0,875	1,1125
max	0,54	0,33	1,1	1,54

Met andere woorden, als een wegbeheerder een tussenlaag voor verkeersklasse A, B of C vraagt of een onderlaag voor verkeersklasse C (allen met $f_c \leq 0,4$), dan voldoet (uitgaande van de gemiddelde waarde uit bovenstaande tabel) dit materiaal wél als het wordt beproefd zonder wrijvingsreductie of met teflon als wrijvingsreductie, maar niet indien de andere twee reducties gebruikt worden.

Vanwege de wijziging in de norm betekent dit ook dat indien de proef conform EN 12697-25:2005 wordt beproefd, het asfalt niet voldoet (latex), en bij testen conform EN12697-25:2016 (teflon), wel. Hetzelfde geldt voor producenten/aannemers die dit materiaal type testen: onder de norm uit 2005 zou het materiaal voor geen enkele tussenlaag en alleen voor onderlagen bij verkeersklassen A en B gebruikt kunnen worden ($f_c \leq 0,8$), terwijl het bij testen conform de norm uit 2012 (teflon) voor OL-A t/m C en voor TL-A t/m C geschikt wordt bevonden ($f_c \leq 0,4$).

Het feit dat hetzelfde asfalt, beproefd bij dezelfde temperatuur en met dezelfde belasting op kernen met dezelfde afmetingen, ingedeeld wordt in een andere klasse als gevolg van het gebruik van een andere wrijvingsreductie methode, is de directe aanleiding voor dit project.

2.1 Historisch overzicht wrijvingsreductie

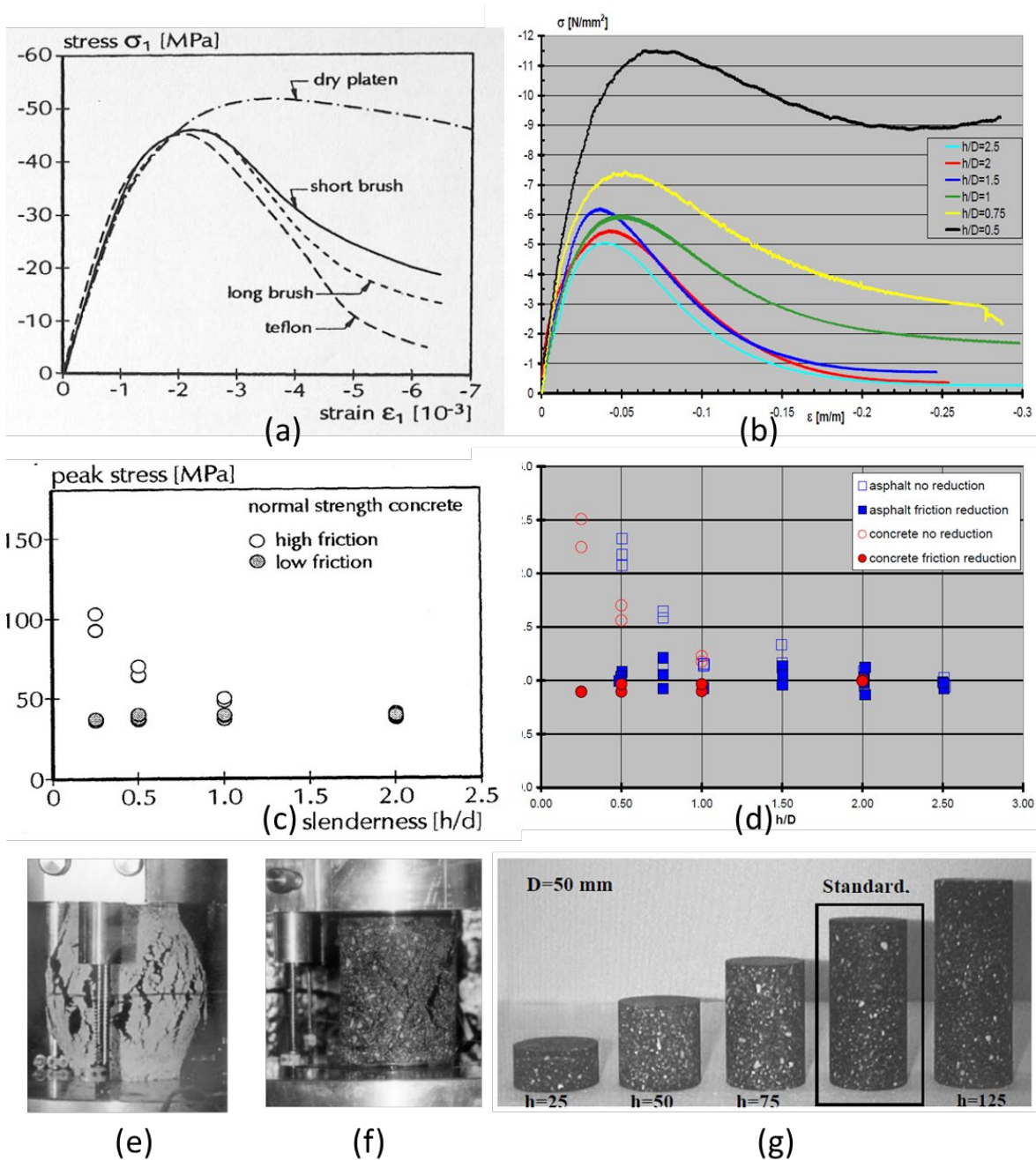
Dat wrijving tussen proefstuk en opstelling invloed heeft op de test resultaten mag algemeen bekend worden verondersteld, aangezien hier al meer dan honderd jaar over gepubliceerd wordt: Timoshenko refereert in een publicatie naar een statement van Otto Mohr uit 1882, “...*the friction on the contact surfaces must have a great effect on the stress distributions, so that the results are not those of a true compression test*”, waarin hij Bauschinger kritiseert voor het gebruik van kubusvormige proefstukken zonder wrijvingsreductie.

Doordat in de proef de verticale spanning gelijk is in de belastingplaat en in het proefstuk, terwijl de stijfheid (en Poisson constante) verschillen, ontstaan er verschillende horizontale rekken. Als die vervormingen vrij op kunnen treden, is er geen probleem, maar doordat het contactvlak nooit volledig wrijvingsloos is en er bovendien druk wordt uitgeoefend, wordt de natuurlijk optredende vervorming van het proefstuk verhinderd en dit beïnvloed de resultaten.

Ook recentere studies tonen aan dat wrijvingsreductie een significant effect kan hebben op de testresultaten, zoals blijkt uit (uniaxiale) bezwijkproeven op zowel beton ((Vonk 1989) en (van Mier 1997)) als asfaltbeton (Erkens and Poot 2000, Erkens 2002b).

Figuur 2.2 vat dit samen, waar (a) het effect laat zien van diverse wrijvingsreductie methoden op het spanning-rek verloop van een beton proefstuk met dezelfde afmetingen en waar (b) hetzelfde weergeeft, alleen dan voor een asfalt proefstuk met een variërende slankheid (h/D ratio) in plaats van variërende wrijvingsreductie (in dit geval is er geen wrijvingsreductie gebruikt). Grafiek (c) toont de piekspanning (sterkte) in bezwijkproeven op beton mét (=low friction) en zónder (=high friction) wrijvingsreductie als functie van de slankheid (h/D ratio). In (d) is dit nogmaals getoond alleen dan voor asfalt en relatief ten opzichte van de gemiddelde sterkte voor $h/D=2$.

Tenslotte laten (e) en (f) asfalt proefstukken zien die getest zijn zónder (e) en mét wrijvingsreductie (f) en toont (g) de proefstukken met de verschillende h/D ratio's gebruikt in de proeven getoond in (b) en (d). De grafieken zijn afkomstig uit (van Mier 1997) (a) en (c)), (Erkens and Poot 2000), (b) en (d) en (Erkens 2002b), (d), (e) en (f).

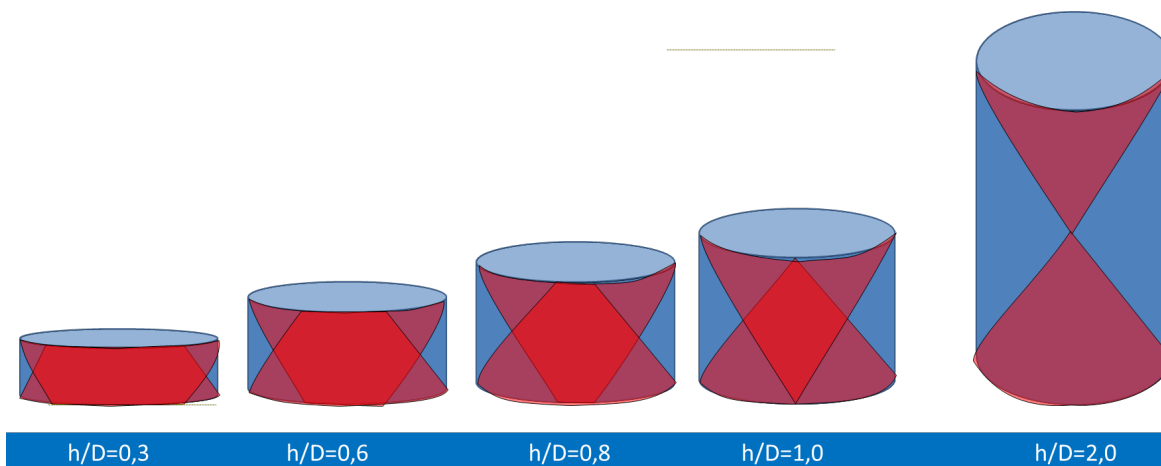


Figuur 2.3: Effect van (gebrek aan) wrijvingsreductie resp. h/D in faalproeven op beton, (a) en (c) en asfalt, (b) en (d), met de bij (d) $h/D=2$ behorende vervormingen zonder (e) en met (f) wrijvingsreductie en de in (d) gebruikte proefstukafmetingen (g)

Deze grafieken laten het effect van de wrijving op de responsie van materialen zien. Het toont ook aan dat er 2 manieren zijn om de invloed van de wrijving bij het contactvlak te beperken.

1. Het gebruik van een wrijvingsreductie methode, waarbij gebruik wordt gemaakt van smeermiddelen en van platen of tussenlagen met een stijfheid die dichter bij die van het beproefde materiaal ligt, waardoor het verschil in rek kleiner wordt. Bij het gebruik van relatief slappe "borstels" (platen van kolommen die uit elkaar kunnen wijken door buiging) of materialen met een v/E die kleiner is dan die van het proefstuk kan er zelfs (lokale) trek ontstaan in de contactvlakken
2. Het gebruik van hogere h/D ratio's, doordat het effect van de wrijving afneemt over de proefstuk hoogte, zorgen voldoende hoge proefstukken voor betrouwbare metingen. Voor sterkte metingen (Figuur 2.3) blijkt $h/D=2,0$ vaak voldoende voor een betrouwbare meting. Het idee is dat bij $h/D=2$ in

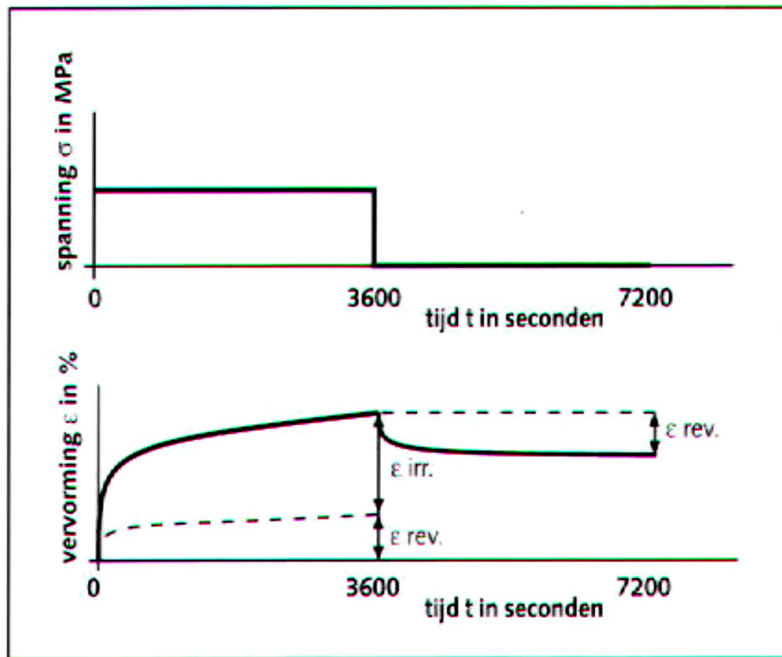
het midden van het proefstuk er een vlak is waar er geen effect is van wrijving, hoe gedrongener het proefstuk, hoe meer de invloedssferen van wrijving aan weerszijden van het proefstuk overlappen (Figuur 2.4) en hoe groter de invloed op de meetresultaten. Het is hierbij wel van belang te toetsen of de gewenste eigenschap betrouwbaar gemeten kan worden, zo laat (d) zien dat hoewel voor asfalt bij een h/D van 2 een betrouwbare druksterkte gemeten werd, de vervorming in de proefstukken met en zonder wrijvingsreductie (f en e) nog flink verschillen. Voor stijfheden of metingen van het vervormingspatroon zou deze h/D dus nog niet geschikt zijn.



Figuur 2.4: Effect van slankheid op invloed wrijving

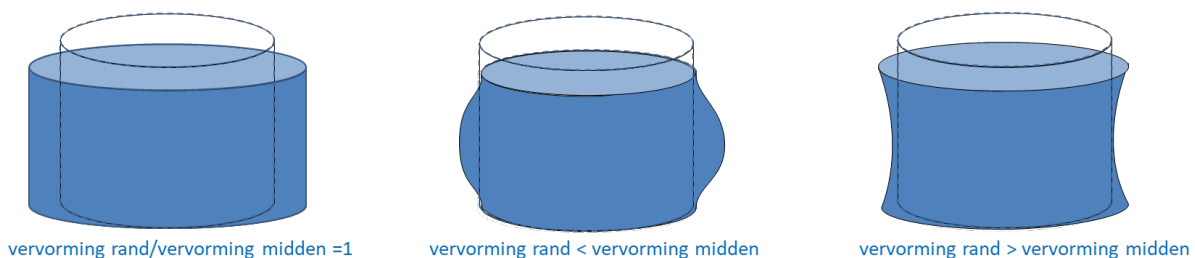
De tweede manier is sowieso niet erg handig bij het beproeven van asfalt, omdat de laagdikte in het asfaltpakket varieert tussen 40 en 90 mm. Dit betekent dat, ondanks dat in het lab hogere proefstukken (dus met hogere h/D ratio's) kunnen worden gemaakt, er geen vergelijking plaats kan vinden tussen lab- en praktische eigenschappen vanwege de proefstuk afmetingen en de waarschijnlijk daaraan gerelateerde verdichtingseigenschappen. Zodoende is een effectieve wrijvingsreductie methode van groot belang bij het beproeven van asfalt.

Getalsmatig had Bolk ((1980)) dit belang ook al vastgesteld voor de klassieke kruipproef. In deze proef worden asfalt kernen van 60 mm hoog en 100 mm (bij een korrel van maximaal 16 mm) of 150 mm diameter (met een maximale korrel groter dan 16 mm) uniaxiaal belast met een constante spanning van 0,1 MPa gedurende 1 uur, waarbij soms ook de vervorming in het uur na ontlasten gemeten werd (DWW 1991, (DWW);, KOAC; et al. 1995) en Figuur 2.5.



Figuur 2.5: opgelegde spanning (boven) en gemeten vervorming (onder) in de statische kruipproef (overgenomen uit DWW (1991))

De standaard wrijvingsreductie in de statische kruipproef was een mengsel van glycerine met talkpoeder, waarover met een doek grafiekpoeider werd gewreven ((DWW);, KOAC; et al. 1995). Bolk ((1980)) citeert een onderzoek van Staub³ waarin de afwijking van de originele cilinder vorm (uitgedrukt als de verhouding tussen het gemiddelde van de radiale vervormingen, gemeten boven en onderaan het proefstuk en die in het midden) voor een aantal verschillende wrijvingsreductie systemen wordt gegeven (Tabel 2.3). Deze maat voor uniformiteit van de vervorming van het proefstuk gaat uit van het basis principe van de proef: als het proefstuk uniaxiaal belast wordt en volledig vrij kan vervormen, zou de verticale spanning en daarmee ook de radiale vervorming over de hele proefstukhoogte gelijk zijn (Figuur 2.5, links). Als de vervorming niet vrij kan optreden, is het meestal zo dat de (veel stijvere) belastingplaten de horizontale vervorming van het proefstuk tegenhouden, met als gevolg tonvorming (Figuur 2.5, midden). Het kan ook gebeuren dat er een materiaal met lagere stijfheid (zoals rubber) wordt gebruikt tussen belastingplaat en proefstuk. Dan leidt de wrijving tussen proefstuk en rubber juist tot extra vervorming bij de contactvlakken, zodat er een zandlopervorm ontstaat (Figuur 2.5, rechts). Hoe groter de invloed van de randen, hoe groter het verschil tussen de radiale vervorming bij de randen en in het midden is. Door de radiale vervormingen aan de randen te vergelijken met die in het midden, wordt dus een indicatie verkregen van de mate waarin de spanningen en vervormingen in het proefstuk het uniforme ideaalbeeld benaderen.



Figuur 2.6: Proefstukvervorming onder druk in het ideale geval (links) bij druk (wrijving) in het contactvlak (midden) en bij trek in het contactvlak (rechts)

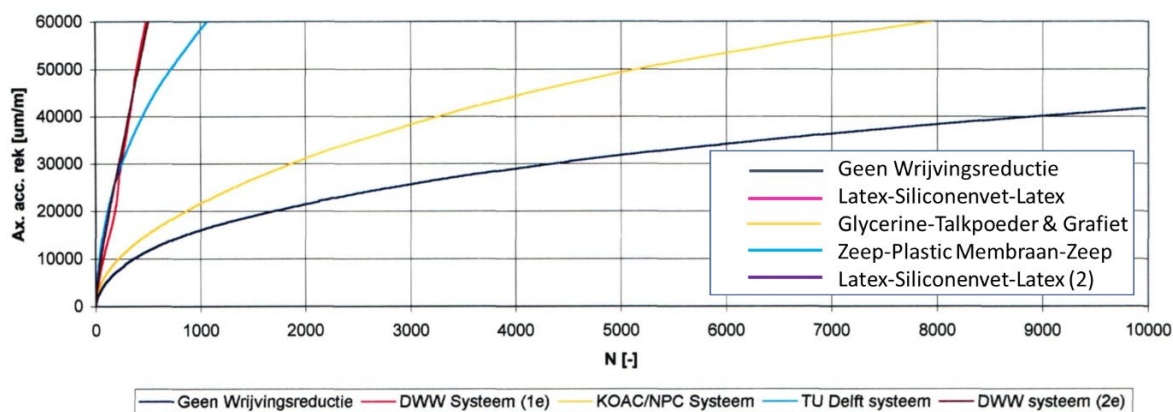
³ Van de publicatie van Bolk is alleen een uittreksel beschikbaar en de originele verwijzing is daarin niet opgenomen

Uit het door Bolk gebruikte onderzoek komt het systeem met twee dunne latex lagen als beste oplossing naar voren (verhouding tussen rek bij de randen en in het midden het dichtste bij 1).

Tabel 2.3: Effect wrijvingsreductie systeem in statische kruipproef ((Bolk 1980))

Friction reduction system	$(\epsilon_{\text{top}} + \epsilon_{\text{bottom}})/2 : \epsilon_{\text{centre}}$
Geen smeermiddel	0,39
Teflon	0,67
Grafietvlokken en vet	0,70
Borstel van kunststof	0,75
Twee dunne rubbermembranen met daartussen een dunne laag vet	1,05

Dat het effect van de wrijving aan het contactoppervlak ook in de triaxiale cyclische drukproef op asfalt een rol speelt werd in Nederland zichtbaar toen bij een nationale “round Robin” test, voorafgaande aan de introductie van de CEN normen voor Asfalt, grote verschillen werden gevonden ((Oosterbaan 2001a)). Dit leidde tot een beperkte vergelijking van wrijvingsreductie methoden. Dit toonde aan dat het effect, bij het toen nog gebruikte signaal (blokpuls) en een proefstukhoogte van 50 mm, aanzienlijk was. Uiteindelijk resulteerde dit in het advies om een latex membraan als wrijvingsreducerende laag te gebruiken en op te nemen in de CEN norm ((Oosterbaan 2001b)b).



Figuur 2.7: Effect wrijvingsreductie systemen uit verkennend onderzoek ((Oosterbaan 2001b)b)

Vanwege deze ervaringen met wrijvingsreductie in diverse proeven werd in 2013 een ringonderzoek gedaan op centraal geproduceerde OAB kernen, waarbij verschillende aannemers vier triaxiaalproeven deden met hun eigen standaard wrijvingsreductie systeem. De resultaten lieten grote variatie zien in zowel de gebruikte systemen voor de wrijvingsreductie, als de resultaten:

systeem	f_c [$\mu\text{m/m/cyclus}$]
Latex membraan-siliconen vet-latex membraan, dikte latex 0,3 mm	1,26
Latex membraan-siliconen vet-latex membraan, dikte latex 0,5 mm	1,5
Rubber-siliconenvet-marshallpapier	1,1
Enkel Teflon (TPFE) vel	0,7
PTFE-PTFE-spuitsvet- Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) folie	0,65
Marshallpapier-siliconen-marshallpapier of marshallpapier-PE kunststofvel-siliconenvet-PE-kunststofvel (Rasenberg)	0,3-0,5

Naar aanleiding van dit ringonderzoek is in 2015 een vergelijkend onderzoek gedaan naar vijf verschillende wrijvingsreductiemethoden ((Poot and Erkens 2015) en (2016)).

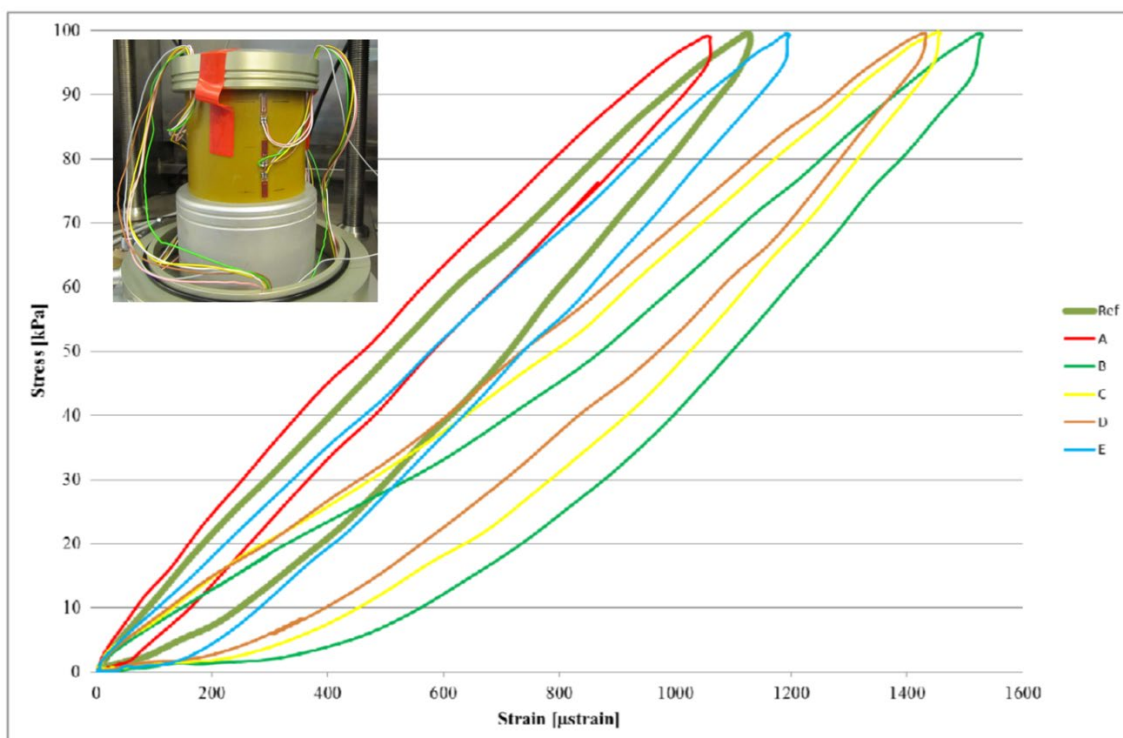
- latex sheet ($d=0,3$ mm) - siliconen vet ($m=0,5$ gram) - latex sheet ($d=0,3$ mm)
- twee teflon (PTFE) sheets ($d=0,5$ mm) op elkaar

- C. een sheet teflon (PTFE), $d=0,5\text{mm}$, zoals in de concept Europese proefnorm NEN-EN 12697-25B
- D. PTFE-siliconenvet-vershoudfolie
- E. Latex sheet ($d=0,5\text{ mm}$)-siliconenvet ($m=0,5\text{ gram}$) – latex sheet ($d=0,5\text{ mm}$)

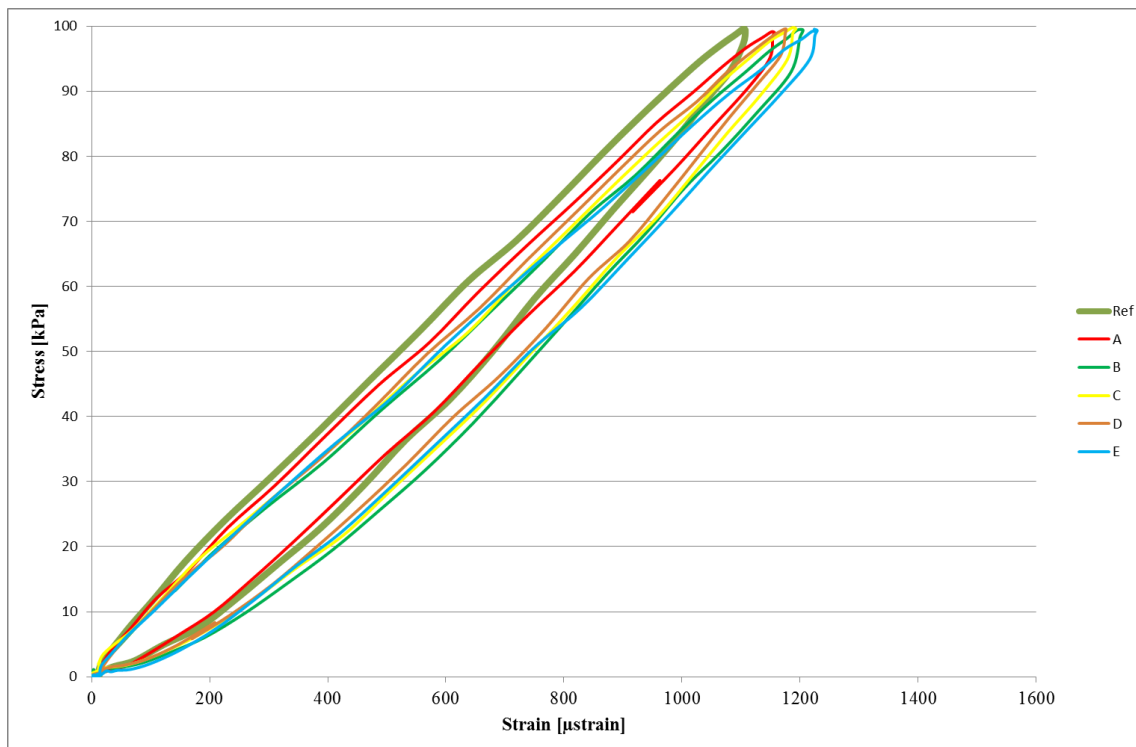
Uit de eerste fase van het onderzoek, op polyurethaan (PUR) proefstukken, bleek dat de dunne latex (A) en teflon (B) systemen de extremen van de gebruikte systemen vertegenwoordigden. Dit is te zien in Figuur 2.2 waar de hystereselussen gegeven zijn op basis van de (axiale) rek en spanning. De referentie is zonder wrijvingsreductie. De resultaten, latex dichtbij de referentie en teflon juist ver er vanaf, lijken in eerste instantie strijdig met de eerder genoemde resultaten, maar het proefstuk is van PUR, dat een stijfheid bleek te hebben van 80-90 MPa en niet de beoogde 2000-3000 MPa (verwachtte stijfheid asfalt bij 20°C en het opgelegde belastingsignaal). Er is dan dus weinig verschil tussen geen wrijvingsreductie en de 'latex reductie' en dat laat figuur 2.8 ook zien.

Ook is dit onderzoek gebaseerd op de axiale rek, niet op de radiale. Dat de axiale rek bij de platen beïnvloed wordt door de optredende wrijving is duidelijk, maar niet eenvoudig is te zeggen of deze bij meer wrijving groter of juist kleiner zal zijn. Wel ligt het voor de hand dat de referentie (zonder wrijvingsreductie) in de buurt ligt van het materiaal met de minste wrijvingsreductie.

In de proef zijn de wrijvingsreductiemethoden aan de onderkant van het proefstuk gevarieerd, aan de bovenkant is telkens geen wrijvingsreductie toegepast, waardoor de axiale signalen bovenaan dicht bij elkaar lagen en over de proefstukhoogte gingen variëren. In die zin zouden radiale rekstroken op verschillende hoogtes een zuiverder vergelijking opleveren. Omdat er dicht bij de boven/onderkant en in het midden wel axiale, maar geen radiale rekstroken geplaatst waren (axiale rek op 1 hoogte gemeten) kan er niet gekeken worden naar de mate van tonvorming en de invloed hiervan op het totaal beeld of de vergelijking met eerdere proeven.



Figuur 2.8: Hystereselussen van de axiale rek aan de onderzijde voor verschillende wrijvingsreductie systemen



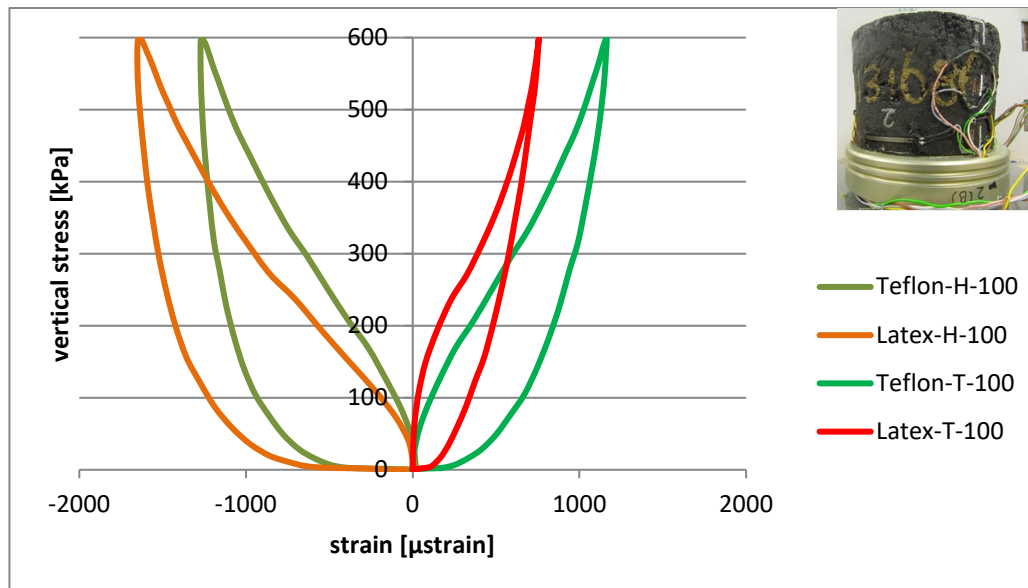
Figuur 2.9: Hysterese lussen van de axiale rek in het midden voor verschillende wrijvingsreductie systemen

Wordt gekeken naar de hysterese lussen van de axiale rek (Figuur 2.9) in het midden ten opzichte van die aan de onderzijde (Figuur 2.8) en gaan we er vanuit dat in het midden de wrijving nauwelijks meer een rol speelt dan blijkt er zonder wrijvingsreductie weinig verschil in die signalen te zijn, qua grootte niet en qua vorm niet. Blijkbaar is de wrijving in het contactvlak beperkt door de lage v/E van het PUR. De radiale rek is relatief groot. Tegelijkertijd is de normaalkracht (axiale spanning) relatief klein in vergelijking met de condities voor asfalt (450 resp. 750 kPa piekspanning in plaats van 100 kPa). En die normaalkracht is weer evenredig is met de wrijving.

Het aanbrengen van een stijvere tussenlaag zoals teflon (B) tussen PUR proefstuk en belastingplaat verhoogt blijkbaar de wrijving, aangezien de axiale rek toeneemt (zie Figuur 2.8). Hierbij gaan we er vanuit dat de buiging van de rekstrook leidend is bij de aanwezigheid van meer wrijving.

Bij het aanbrengen van PTFE-siliconenvet-vershoudfolie (systeem D), wat algemeen als beter wrijvingsreductiesysteem wordt beschouwd, neemt inderdaad de axiale rek minder toe. Daar wordt minder wrijving verwacht en dus minder buiging (tonvorming).

Uit de tweede fase uit dit onderzoek werd deze beschouwing bevestigd. Deze fase beschouwt de triaxiaalproef op een asfaltproefstuk ($h=80$ mm en $\varnothing=100$ mm) en is uitgevoerd met twee wrijvingsreductie systemen A (Latex) en B (Teflon). De proef is, conform het RAW deklaagprotocol, uitgevoerd met een steundruk van 150 kPa, bij een temperatuur van 50°C en met $\sigma_a = 600$ kPa. Er zijn 10.000 lastherhalingen opgelegd, waarbij de 100ste lastherhaling is weergegeven. De rekstrook signalen zijn per hoogte gemiddeld en de wrijvingsreductie systemen zitten aan beide zijden van het proefstuk. (Figuur 2.10)



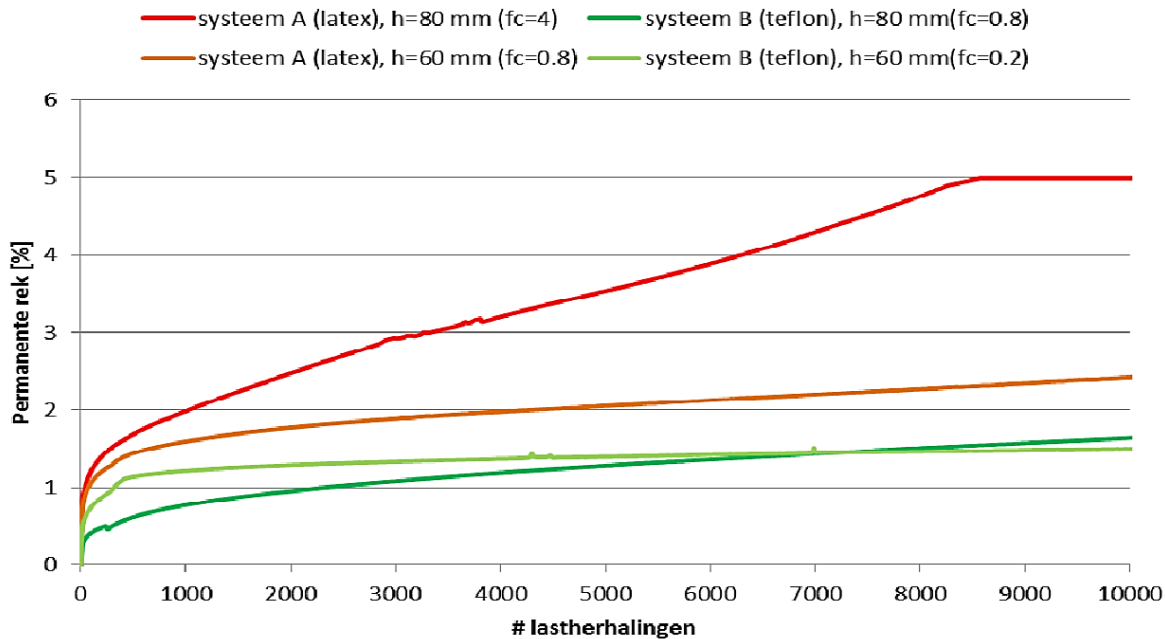
Figuur 2.10: : Rek-spanningslus aan de bovenzijde van de gemiddelde radiale (H) en gemiddelde axiale rekstroken (T) van de wrijvingsreductiesystemen A (Latex) en B (Teflon)

In figuur 2.10 is te zien dat het teflon de wrijving minder reduceert hetgeen resulteert in een hogere axiale rek (Teflon-T-100) en een lagere radiale rek (Teflon-H-100). Bij het Latex systeem is een lagere axiale rek (Latex-T-100) te zien en een hogere radiale rek (Latex-H-100) dat wijst op minder wrijving of zelfs mogelijke tegengestelde trekspanningen in het contactvlak.

Nader onderzoek naar deze twee systemen op asfalt (waarbij ook verschillende h/D ratio's zijn gebruikt) lieten zien dat zowel de hoogte (h/D) als het wrijvingsreductie systeem invloed had op het gevonden gedrag. De axiale permanente rek en de uit het verloop daarvan bepaalde f_c waarden (Figuur 2.3 en Tabel 2.4) zijn groter bij gebruik van Latex dan bij Teflon. In beide gevallen leidt een slanker proefstuk (h/D=0,8 in plaats van 0,6) tot een grotere axiale vervorming, bij Latex vanaf het begin, bij Teflon pas in de secundaire (lineaire) fase. Ook in dit geval leidt het verschil in wrijvingsreductie tot een plaatsing in verschillende klassen van de RAW eisen.

Tabel 2.4: Gevonden f_c [$\mu\text{m}/\text{m}/\text{cyclus}$] als functie van de wrijvingsreductie en h/D waarde

h/D →	0,6 (60/100)	0,8 (80/100)
Systeem ↓		
Latex	0,8	4
Teflon	0,2	0,8



Figuur 2.11: De invloed van wrijving in de triaxiale cyclische drukproef, afhankelijk van zowel wrijvingsreductie als h/D ratio.

2.2 Probleemstelling en onderzoeksvraag

Zoals hierboven beschreven, wordt het resultaat in de triaxiaalproef op asfalt in sterke mate beïnvloed door de gebruikte wrijvingsreductie methode, wat een probleem is bij het gebruik in het stellen van eisen en beoordelen van mengsels.

Uiteindelijk is het doel om een robuust wrijvingsreductiesysteem te hebben, dat bijdraagt aan een goed onderscheidend vermogen, maar ook goede herhaalbaarheid en reproduceerbaarheid van de metingen van de weerstand tegen permanente vervorming.

2.2.1 onderzoeksvraag

In dit onderzoek wordt gekeken naar een aantal wrijvingsreductiesystemen bij verschillende slankheden van proefstukken om te bepalen welk van deze systemen tot een optimale wrijvingsreductie leidt, uitgedrukt in verhouding tussen de radiale vervormingen aan de randen ten opzichte van die in het midden van het proefstuk.

2.2.2 Hypothesen

1. Radiale rekken: meeste tonvorming bij geen wrijvingsreductie, minste (tot zelfs zandlopervorming) bij Latex, rest er tussen in. Of in meer detail:
 - a. voor alle hoogtes zullen de proefstukken zonder wrijvingsreductie het grootste verschil tussen radiale vervorming aan de randen en in het midden kennen, waarbij de vervorming aan de randen kleiner is dan in het midden (<1), er treedt dus tonvorming op.
 - b. De volgende hypothese is dat teflon maar beperkt minder wrijving zal geven dan geen wrijvingsreductiesysteem (dus kleine vervormingen in het contactvlak), terwijl bij latex juist grote vervormingen, vermoedelijk zelfs groter dan in het midden (relatieve radiale rek randen >1 , oftewel zandlopervorming) verwacht worden.
 - c. De beide plastic systemen zullen naar verwachting een redelijk homogene vervorming geven, zeker bij hogere h/D en in de buurt van Latex liggen

- d. Daarnaast is de verwachting dat bij uitbuiken de radiale vervorming in het midden groter uitvalt, dus de radiale rek in absolute zin zal bij geen wrijvingsreductie het grootst zijn, gevolgd door Teflon en Latex zal de kleinste waarde hebben.
2. Voor de axiale rekken is de hypothese dat minder wrijving (betere wrijvingsreductie) zal leiden tot meer axiale permanente vervorming en daarmee tot een uiteindelijk hogere f_c waarde.

3 Onderzoeksplan

3.1 Onderzoeksopzet

Op grond van de eerdere onderzoeken en de onderliggende kennis over wrijving is er in dit onderzoek voor gekozen te kijken naar de mate van tonvorming bij het gebruik van een latex en teflon gebaseerd wrijvingsreductie systeem, in vergelijking met het niet gebruiken van wrijvingsreductie. Daarnaast is het TUD systeem met plastisch vervormend folie dat ook in het begin van het triaxiaalonderzoek in Nederland gebruikt is ((Antes, Visser et al. 2001, Oosterbaan 2001a, Oosterbaan 2001b, Visser and Oosterbaan 2001)) meegenomen.

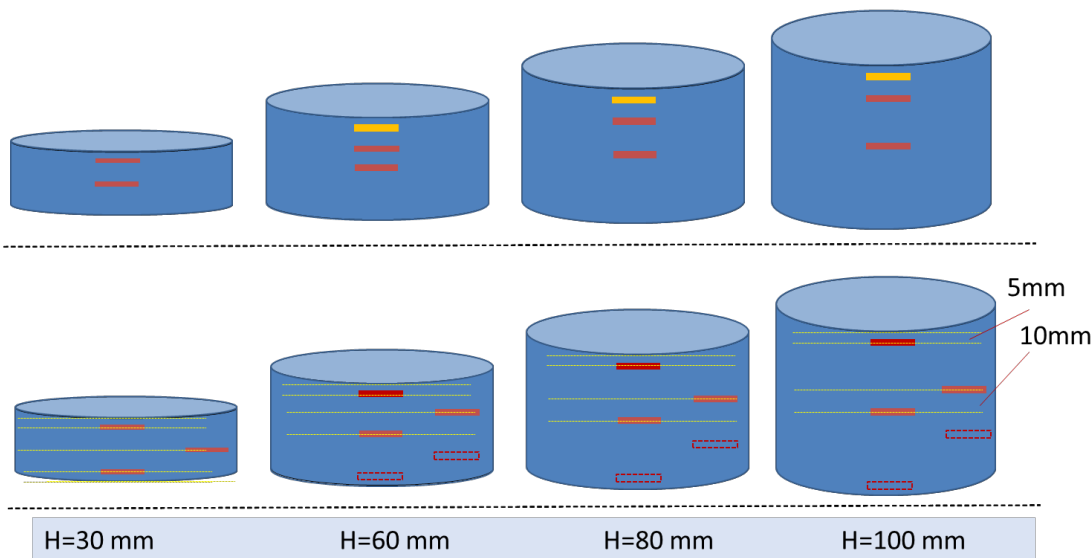
Het uitgangspunt is dat bij een ideaal wrijvingsreductie systeem de spanningssituatie over het gehele proefstuk gelijk is en de diameter daarmee ook: (het gemiddelde van de) horizontale rek boven en onder aan het proefstuk is dan gelijk aan die in het midden.

Om de tonvorming in kaart te brengen, worden er rekstroken in horizontale (radiale) richting geplakt op 3 verschillende hoogten: 5 mm onder de rand, in het midden van het proefstuk en 10 mm boven het midden. Met andere woorden: hoe dichterbij de horizontale rek dichtbij de rand in de buurt zit van de horizontale rek in het midden van het hoogste proefstuk, des te minder is de invloed van de wrijving op de gehele vervorming. De locatie van de rekstroken voor de verschillende h/D verhoudingen is te zien in Figuur 3.1. Zowel 60 mm als 80 mm hoge proefstukken, zoals genoemd in de norm (EN 12697-25), worden beproefd, alsmede een hoger (100 mm) en een lager (30 mm) proefstuk. Dit geeft de mogelijkheid om een trend te ontdekken tussen de rek in het midden en de rek aan de rand aan de ene kant en de proefstukhoogte aan de andere kant. Alle proefstukken worden beplakt met negen rekstroken. Er komen drie rekstroken in het midden, drie op 5 mm van de rand en drie op 10 mm van het midden. De laatste genoemde is dezelfde afstand als de afstand tussen de rekstrook aan de rand en de rekstrook in het midden bij het laagste proefstuk, daarom zijn er op dit proefstuk ook drie rekstroken op 5 mm van de andere rand van het proefstuk geplakt.

Boven in de figuur staat de ideale situatie, met steeds drie rekstroken op dezelfde verticaal, maar dat is in de praktijk niet haalbaar vanwege de lijm van de rekstroken. Daarom is onder in de figuur de werkelijke configuratie gegeven, waarbij de rekstrook aan de rand en in het midden in dezelfde verticale lijn zitten en de rekstrook 10 mm boven het midden 60° gedraaid. Per hoogte zitten er 3 stroken, steeds 120° ten opzichte van elkaar.

Voor de proefstukken van 30 mm hoog zijn er dus rekken bekend van beide randen en het midden, voor de andere proefstukken rekken van het midden, de bovenrand en een punt daar tussen in. Door uit te gaan van symmetrie ten opzichte van het midden kunnen de rek 10 mm boven het midden en aan de bovenrand gespiegeld worden, om zo het totale beeld van de proefstukvervorming te krijgen, met het oog op tonvorming.

Daarnaast wordt er gekeken naar het effect van de slankheid (h/D) van het proefstuk, want hoe verder van de belastingplaat, hoe meer de wrijvingseffecten gereduceerd worden. Bij een hoger proefstuk is er dus een groter gebied met weinig invloed van de wrijving. Het axiale vervormingssignaal is het totaal van de vervorming over de hoogte, maar dat komt dus steeds dichterbij de "pure" situatie naarmate het proefstuk hoger wordt.



Figuur 3.1: Schematische weergave van de proefstukken met verschillende H/D verhoudingen die zijn gebruikt en de locatie van de horizontale rekstroken

Vanwege de twijfels over het effect van de lage stijfheid van het PUR proefstuk in eerder onderzoek ((Poot and Erkens 2015)) is er in dit geval voor gekozen proeven op asfalt te doen. Bijkomend voordeel is dat de proefstukken een representatieve oppervlakte ruwheid hebben. Een risico is dat de heterogeniteit van asfalt in combinatie met de variatie in de triaxiaalproef een vergelijking lastig kan maken. Daarom worden er geen complete proeven gedaan (tot 10000 lastherhalingen), maar wordt op hetzelfde proefstuk een beperkt aantal lastherhalingen (55) gedaan met elk wrijvingsreductiesysteem. Hierdoor is het effect van proefstukvariatie uitgesloten, nadeel is dat er geen f_c waarden bepaald kunnen worden, aangezien deze tussen de 4000 en 10000 herhalingen bepaald worden.

Tenslotte is er, om zoveel mogelijk invloeden uit te sluiten, geen steundruk toegepast, waardoor er op het proefstuk alleen een verticale spanning wordt aangebracht en alle verschillen in horizontale vervorming een gevolg van verschillen in wrijving zullen zijn. De proeven zijn uitgevoerd bij kamertemperatuur om te voorkomen dat er temperatuurgradiënten optreden die tot effecten in horizontale richting zouden kunnen leiden. Bijkomend voordeel is dat dit de proefuitvoering versnelt en vereenvoudigt.

3.2 Proefstukbereiding en instrumentatie

Er zijn STAB 0/11 kernen van $\varnothing$ 100 mm en hoogte H=30 mm, 60, 80 en 100 mm gemaakt door Boskalis. Daartoe zijn eerst met de gyrator $\varnothing$ 150 mm kernen gemaakt en daar is dan een $\varnothing$ 100 mm kern uit geboord. Dit heeft als voordeel dat de buitenkant niet vettig/bitumineus is en de rekstrook op een representatief oppervlak kan worden geplakt. Na het op maat zagen zijn de onder- en bovenzijde gepolijst.

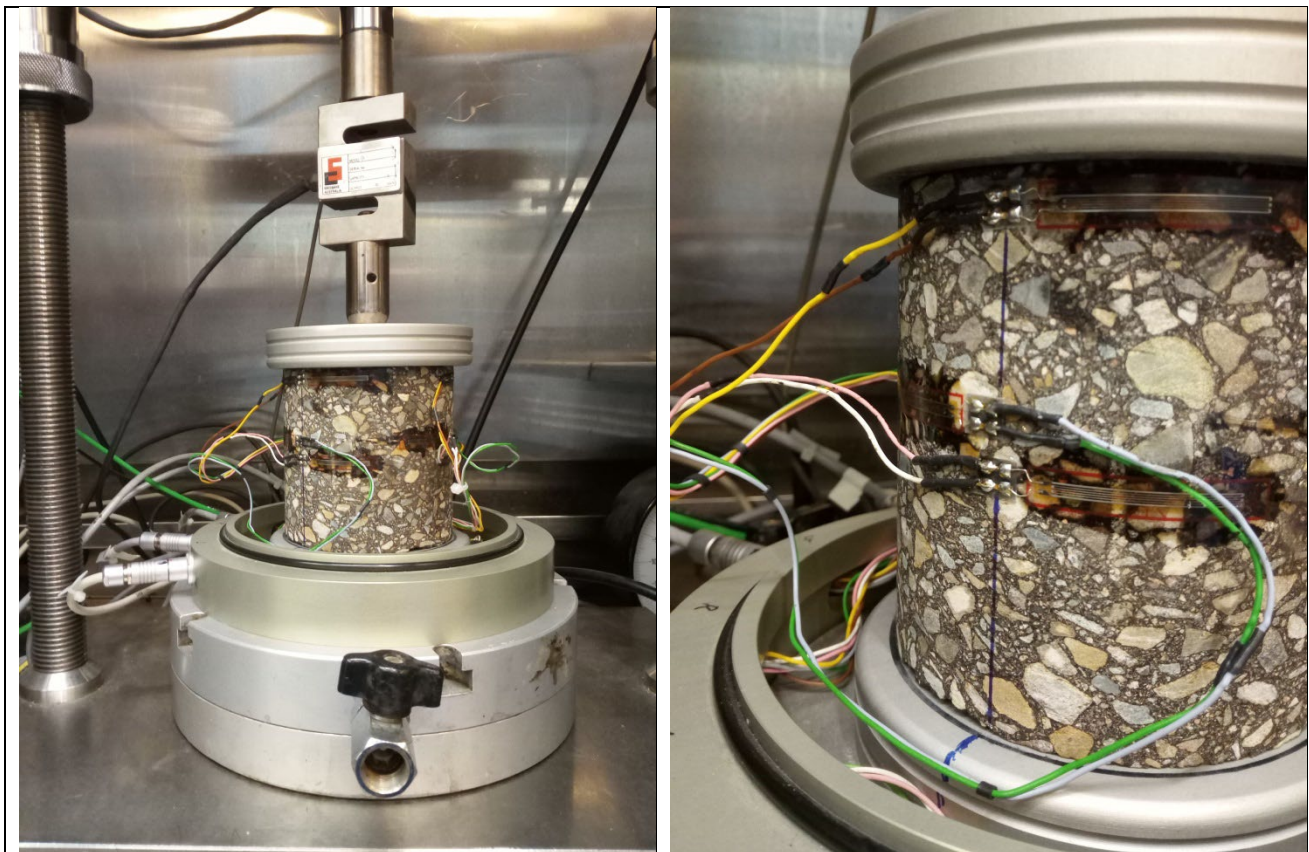
De proefstukken, nog niet voorzien van rekstroken, zijn te zien in Figuur 3.2.



Figuur 3.2: Proefstukken STAB 0/11 (AC 11) gebruikt in Fase 1

De 9 radiale rekstroken worden geplakt op het midden (3), 1 cm boven het midden (3) en 5 mm vanaf de rand (3). De rekstroken zijn van het type PFL-30-11. Gelijmd is met Araldite 2011, een 2 componenten epoxy.

Bij het laagste proefstuk (H=30 mm) is de rekstrook 1 cm boven het midden gelijk de rekstrook aan de rand zodat aan de andere rand nog 3 rekstroken konden worden geplakt. De rekstrook 1 cm vanaf het midden, welke bij het laagste proefstuk de middelste is, kon vanwege overlap van de lijm oppervlakte niet precies verticaal tussen de andere rekstroken worden gelijmd. Daarom is deze 120° versprongen gelijmd (Figuur 3.3).



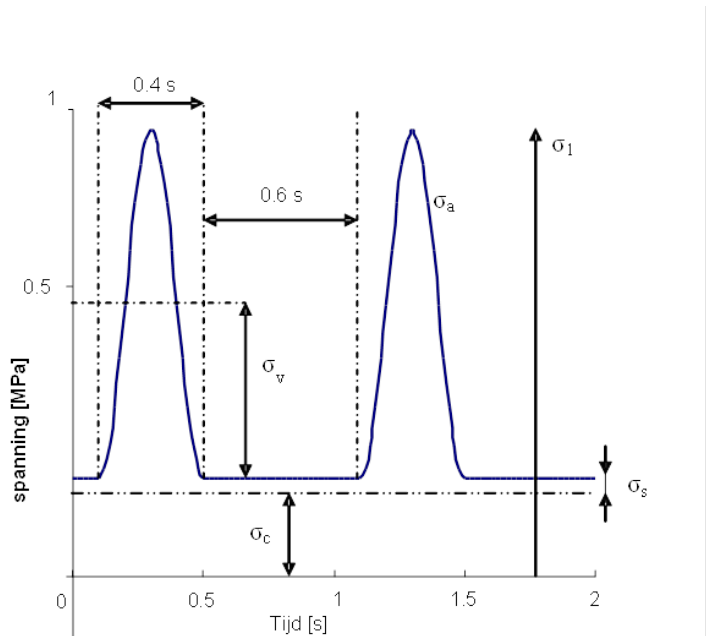
Figuur 3.3: : Proefstuk met H=80 en rekstroken in de opstelling

3.3 Procedure en wrijvingsreductie methoden

De proefstukken zijn axiaal belast met een sinusvormige puls zoals in Figuur 3.4 aangegeven, met $\sigma_c = 0$ kPa (geen steundruk), $\sigma_v = 50$ kPa (piekbelasting = 100 kPa) en bij lab- of kamertemperatuur (23°C). De

belastingsgrootte van 100 kPa zorgt ervoor dat het proefstuk niet teveel permanent vervormt maar wel nauwkeurige cyclische en plastische vergelijkbare signalen oplevert.

Voor elke meting is het proefstuk voorbelast met 50 lastherhalingen van $\sigma_a = 40$ kPa. Dit is gedaan om met de meting zo goed mogelijk uit de primaire initiële vervorming en in het representatieve quasi-lineaire gedeelte te geraken. Een kleine contactspanning van $\sigma_a = 3$ kPa is gedurende de lastherhalingen altijd aanwezig. De rekstrook signalen zijn per hoogte gemiddeld.



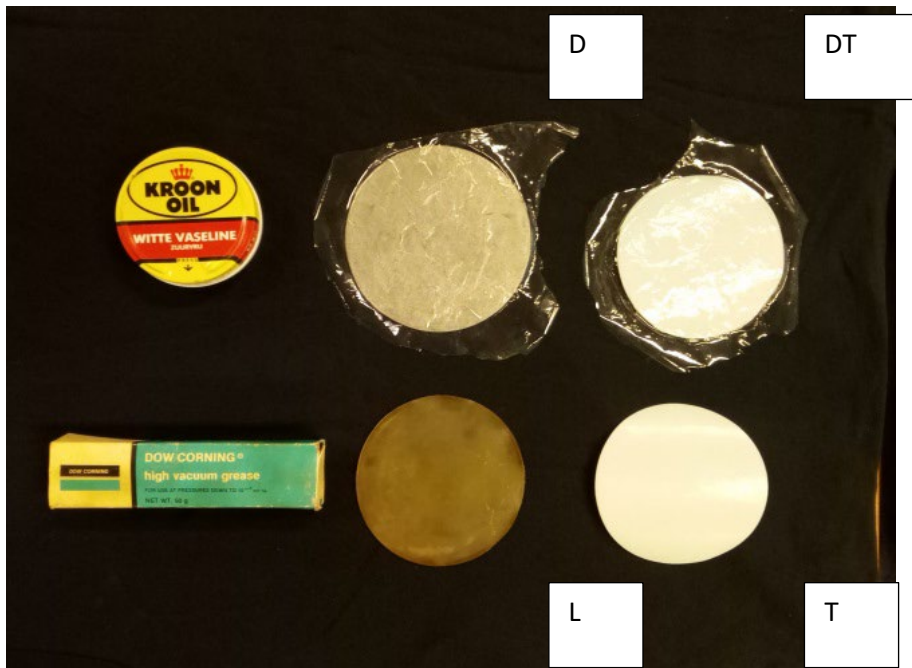
Figuur 3.4: Axiale belastingssignaal in de triaxiaalproef

Het totale cyclische radiale signaal wordt vanaf de eerste lastherhaling tot de laatste (55) gemeten. Hierbij wordt bij elke kern eerst geen wrijvingsreductie toegepast en daarna achtereenvolgens 4 verschillende wrijvingsreductie methoden aan beiden zijden toegepast, dus achtereenvolgens: geen (G), latex (L), teflon (T) en 2 "TU delft" systemen (D en DT).

De wrijvingsreductie methoden zijn als volgt toegepast en gecodeerd:

1. Geen reductie. Proefstuk zit direct tegen belastingplaat (materiaal is Fortal, gehard Aluminium) –**G**
2. latex sheet (d=0,3 mm) - 0,5 gram siliconen vet - latex sheet (d=0,3 mm)–**L**
3. Teflon (PTFE) sheet (d=0,5 mm) conform NEN-EN 12697-25B (2016)–**T**
4. RVS rond plaatje PTFE-1 gram vaseline-dunne plastic laag vershoudfolie–**D**
5. Teflon (PTFE) rond plaatje (d=0,5 mm)-1 gram vaseline- dunne plastic laag vershoudfolie–**DT**

Zie ook Figuur 3.4.



Figuur 3.5: : De diverse wrijvingsreductie methoden

3.4 Referentiewaarde radiale rek

Om een indruk te krijgen wat de cyclische radiale rek zonder wrijving zou moeten zijn is de stijfheid gemeten van het STAB 0/11 proefstuk met de hoogte $H=30$ mm in de Indirect trekproef (Figuur 3.6).



Figuur 3.6: De indirect trekproef configuratie

Gemeten is bij dezelfde temperatuur ($T=23^{\circ}\text{C}$) en belasting (zie Figuur 3.4, dus met frequentie 1 Hz en pulsduur 400 ms) als in de triaxiaalproef. Er is gebruik gemaakt van de formule:

$$M_r = \frac{F(\nu + 0.27)}{l \cdot \Delta d} \quad (3.1)$$

M_r = resilient Modulus [MPa]

F = maximale kracht (repeated load) [N]

ν = Poisson's ratio (0,35)

l = hoogte proefstuk [mm] (30)

Δd = totale terugverende (resilient) horizontale deformatie [mm]

De gevonden stijfheid (M_r) bedroeg 3800 MPa. Bij een drukspanning van 100 kPa (gebruikt in de triaxiaalproef) volgt er een radiale rek van:

$$\varepsilon_{rad} = -\frac{\sigma \cdot \nu}{M_r} = -\frac{-0,1 \cdot (0,35)}{3800} = 9,2 \mu\text{rek} \quad (3.2)$$

4 Test resultaten & discussie

In dit hoofdstuk worden de meetresultaten weergegeven. Per proef worden de gemiddelde totale radiale rek en de permanente axiale rek als functie van N weergegeven. De eerste wordt gebruikt om een maat voor de tonvorming te bepalen, de laatste geeft een indicatie van de axiale vervormingen.

Hoewel er op de meeste kernen meerdere proeven gedaan zijn, is per combinatie van h/D en wrijvingsreductiesysteem één proevenserie (de eerste) uitgewerkt, zodat er geen verschillen ontstaan in de hoeveelheid beschikbare data en de nauwkeurigheid van bepalingen.

De waarden van de gemiddelde radiale elastische en plastische rek op de verschillende hoogtes en de relatieve waarden daarvan ten opzichte van de waarde in het midden worden gegeven voor de 40^e puls (omdat het signaal daar voor alle proeven min of meer lineair is). Hierbij wordt ook per hoogte de verhouding tussen de elastische en plastische rek gegeven. De gemiddelde relatieve (ten opzicht van het midden van het proefstuk) permanente radiale rek op de verschillende hoogten wordt ook geplot om een beeld te geven van de proefstukvervorming.

Omdat er steeds drie rekstroken per hoogte zijn geplaatst en twee verplaatsingsopnemers (LVDTs) gebruikt zijn voor de axiale vervorming, wordt in een deel van de grafieken ook een foutenbalk getoond. Deze foutenbalken geven twee keer de standaardafwijking voor dat meetpunt, wat ongeveer overeenkomt met 95% betrouwbaarheid.

4.1 Overzicht proeven en condities

In Tabel 4.1 is het overzicht gegeven van de aantallen proeven met elk wrijvingsreductiesysteem bij elke proefstukhoogte.

Tabel 4.1: Overzicht aantal metingen per combinatie van proefstukhoogte en wrijvingsreductie systeem

h/D Systeem	0,3 ($h=30$ mm)	0,6 ($h=60$ mm)	0,8 ($h=80$ mm)	1 ($h=100$ mm)
Geen (G)	3	2	4	3
Latex (L)	2	1	1	1
Teflon (T)	2	1	1	1
Plastic folie (D)	4	1	2	2
Teflon-plastic folie (DT)	2	1	2	1

De resultaten worden individueel, per hoogte en per wrijvingsreductiesysteem en overall bekeken, waarbij de totale radiale reksignalen worden beschouwd op:

- de verhouding elastisch/plastisch
- tonvorming, door de gemiddelde waarden van de plastische horizontale rekken op de verschillende hoogtes te bekijken
- de axiale vervorming, door de LVDT signalen te delen door de proefstukhoogte om een overall axiale rek te krijgen, welke kan worden vergeleken met eerder onderzoek.

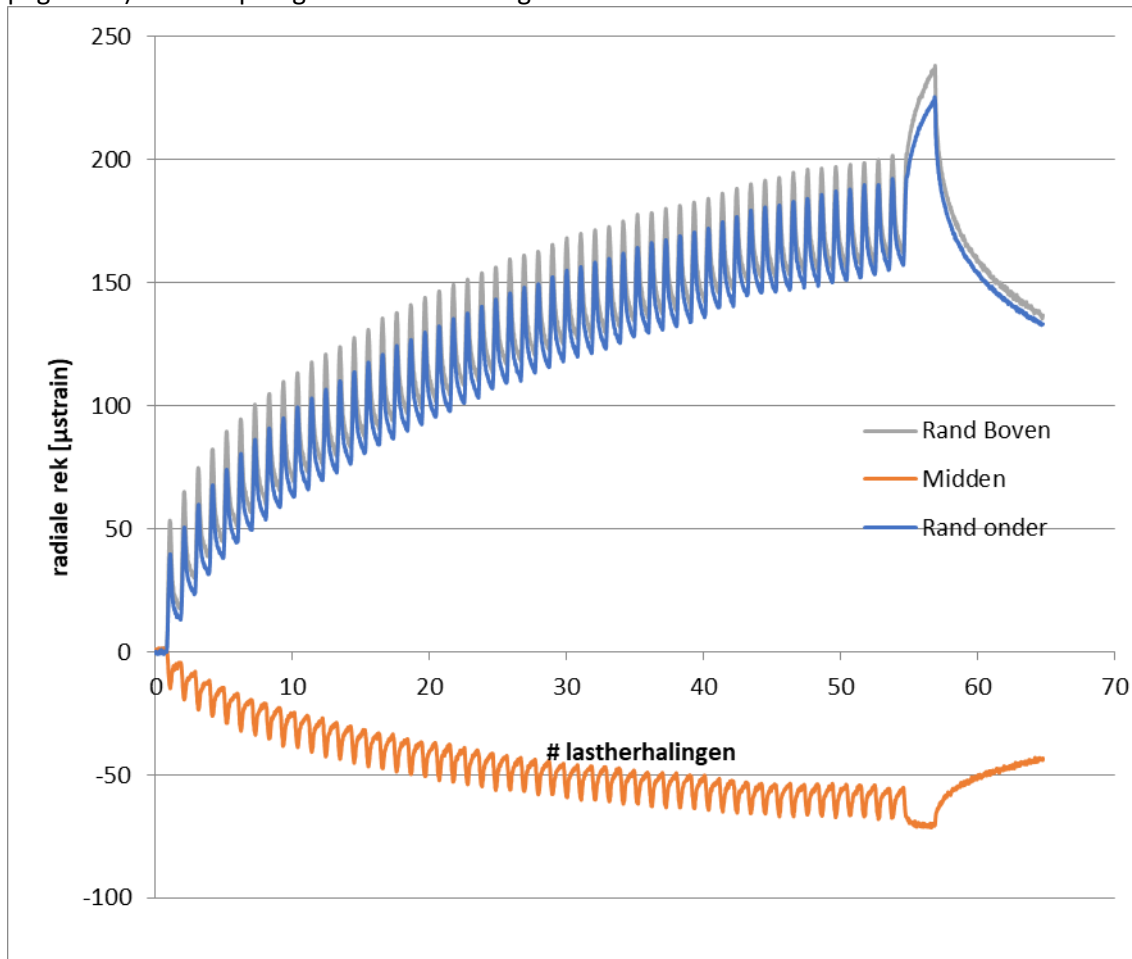
4.2 Individuele resultaten

4.2.1 $H=30$ mm, geen wrijvingsreductie

Zoals beschreven in sectie 3.3 is gedurende de proef een contactspanning van 3 kPa aanwezig en wordt elke seconde een haversine puls van 100 kPa over 0,4 s aangebracht, waarna een rustpauze van 0,6 s volgt tot de volgende puls. In de proeven is het volledige signaal van elke puls gemeten voor de radiale rekstroken en de

axiale LVDTs. In Figuur 4.1 is het gemiddelde signaal van de drie rekstroken op elke hoogte (voor $H=30$ mm is dat 5 mm boven de onderrand, in het midden en 5 mm onder de bovenrand) weergegeven. Positieve radiale rek betekent uitzetting, de omtrek (en diameter) neemt dan toe, negatieve rek betekent een afname.

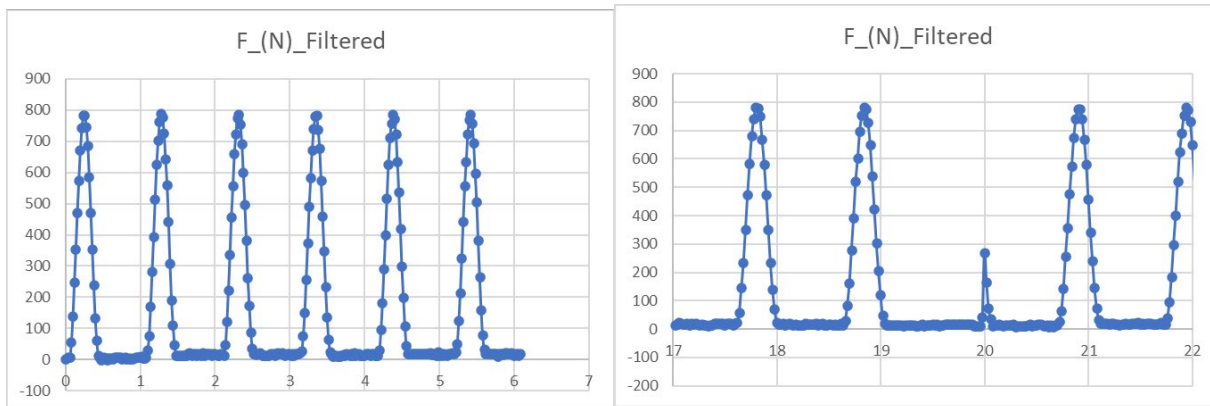
In een drukproef is de verwachting dat de hoogte afneemt, terwijl de omtrek van het proefstuk groter wordt. Verrassend genoeg is in Figuur 4.1 te zien dat de rekstroken in het midden een afname van de vervorming laten zien. Hierop wordt verder ingegaan in het deel waarin de data wordt geanalyseerd (paragraaf 4.6 op pagina 78). In deze paragraaf wordt alleen getoond hoe de resultaten er uit zien.



Figuur 4.1: Gemiddelde radiale rekstrooksignalen per hoogte bij $H=30$ mm zonder wrijvingsreductie

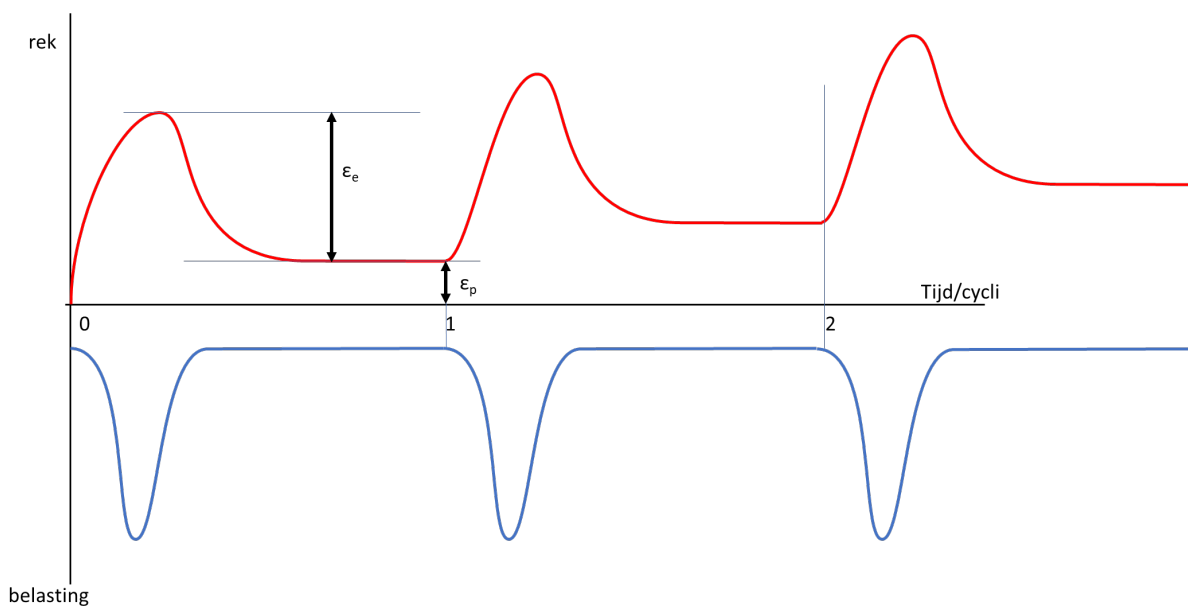
Het voordeel van het meten van het volledige signaal is dat er veel informatie beschikbaar is en dat ook de verhouding elastische en plastische vervorming bekend is. Ook kan de data achteraf op andere manieren bekeken worden. In de meeste standaard meetprogramma's wordt maar een in de 10 of twintig pulsen gemeten en wordt de data direct geanalyseerd en omgezet in een blijvende en elastische rek. Nadeel is dat de data zelf geanalyseerd moet worden en dat haperingen die in standaard meetfiles onzichtbaar blijven, zichtbaar worden.

In de data-analyse wordt in het krachtsignaal gezocht naar zeven achtereenvolgende oplopende metingen, het eerst van die 7 punten wordt gezien als de start van een puls. Op deze manier worden alle pulsen bepaald en alle signalen worden op nul gesteld bij het begin van de eerste puls (Figuur 4.2).



Figuur 4.2: Krachtspulsen na nullen signaal bij eerste puls, links de eerste vijf belastingpulsen, rechts een voorbeeld van een hapering in het signaal, de puls rond 20 s wordt niet als een belastingpuls gezien

Vervolgens wordt voor elke puls de startwaarde per rekstrook en LVDT bepaald. Voor de plastische rek/vervorming geldt dat dit de laatste waarde van de vorige cyclus is. De elastische rek/vervorming is het maximum dat in een cyclus optreedt min de plastische waarde (Figuur 4.3). Omdat begin en eindpunt van elke puls bekend zijn uit de toets op het krachtssignaal, kan dit eenvoudig bepaald worden. Omdat sommige signalen negatief (afname van de diameter) bleken te zijn, wordt hier rekening mee gehouden en wordt als het maximum in een puls kleiner of gelijk aan nul is voor die puls niet het maximum maar het minimum bepaald.



Figuur 4.3: Bepalen plastische en elastische rek/vervorming uit de volledige signalen

De gemiddelde elastische en plastische rekken zijn per hoogte op $N=40$ (omdat daar het signaal min of meer constant is) opgenomen in Tabel 4.2. Deze zijn aangegeven in μrek en ook relatief ten opzicht van de gemiddelde gemeten radiale rek in het midden van het proefstuk. Hierbij is ook de verhouding tussen plastische en elastische radiale rek weergegeven per hoogte. Wat hierbij opvalt, is dat de radiale rek in het midden, zowel elastisch als plastisch, wijst op een *kleiner* wordende diameter.

Verder was in paragraaf 3.4 (pagina 21) een referentie waarde voor de radiale elastische rek bepaald met de cyclische ITT. Het idee is dat als het materiaal geen invloed van wrijving ondervindt, de radiale elastische rek ongeveer de daar gevonden $9 \mu\text{e}$ zal bedragen. In dit geval is de rek aan de randen 3 tot 4 keer groter, in het

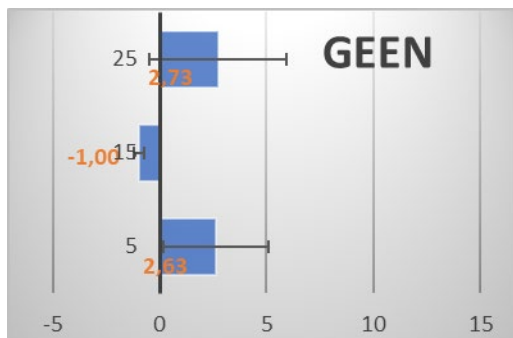
midden is de orde grootte redelijk, maar er wordt een verkleining in plaats van vergroting van de diameter gemeten.

Tabel 4.2: Gemiddelde radiale elastische en plastische rekken [$\mu\epsilon$] per hoogte, absoluut en relatief t.o.v. de (absolute waarde van) de rek in het midden van het proefstuk

H=30 GEEN			
N=40	rand onder	midden	rand boven
eps,e	33,74	-12,88	39,28
	2,62	-1	3,05
eps,p	146,39	-55,74	151,92
	2,63	-1	2,73
eps,e/eps,p	0,23	0,23	0,26

De relatieve gemiddelde radiale plastische rek is ook grafisch uitgezet tegen de hoogte waarop de rekstroken op het proefstuk zitten (Figuur 4.4). Hierbij is ook de dubbele standaardafwijking⁴ geplot, als foutenbalk. Omdat hier de relatieve vervormingen uitstaan (alles gedeeld door vervorming in het midden) is de dubbele standaardafwijking ook door deze waarde gedeeld.

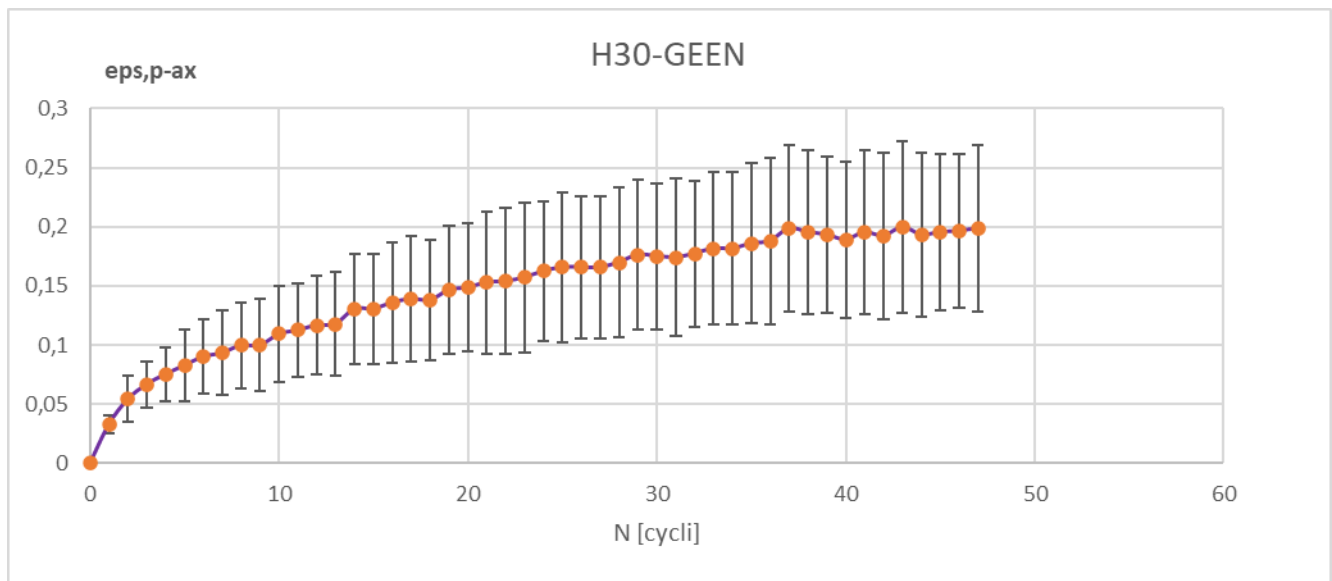
Door de verticale as te zien als de oorspronkelijke rechter zijkant van het proefstuk, geven de balken de vervorming weer: boven- en onderaan neemt de diameter toe, in het midden neemt deze af. Hierbij moet worden aangetekend dat de foutenbalken (2x standaardafwijking) aan boven- en onderzijde groot zijn, wat wijst op veel variatie in de meetresultaten.



Figuur 4.4: Gemiddelde relatieve (t.o.v. rek ter hoogte van midden proefstuk) radiale plastische rekken als functie van de hoogte

Tenslotte is de axiale rek bepaald door het gemiddelde signaal van de 2 LVDT's te delen door de proefstukhoogte. Ook hier zijn de foutenbalken twee keer de standaardafwijking. Hoewel het proefstuk onder druk verkort, is de permanente axiale rek hier als positief weergegeven, zoals gebruikelijk in de triaxiaalproef. Ook in dit signaal is de foutmarge (weergegeven is 2x standaardafwijking) groot.

⁴ 2*standaardafwijking geeft het gebied waarin ca 95% van de waarden valt

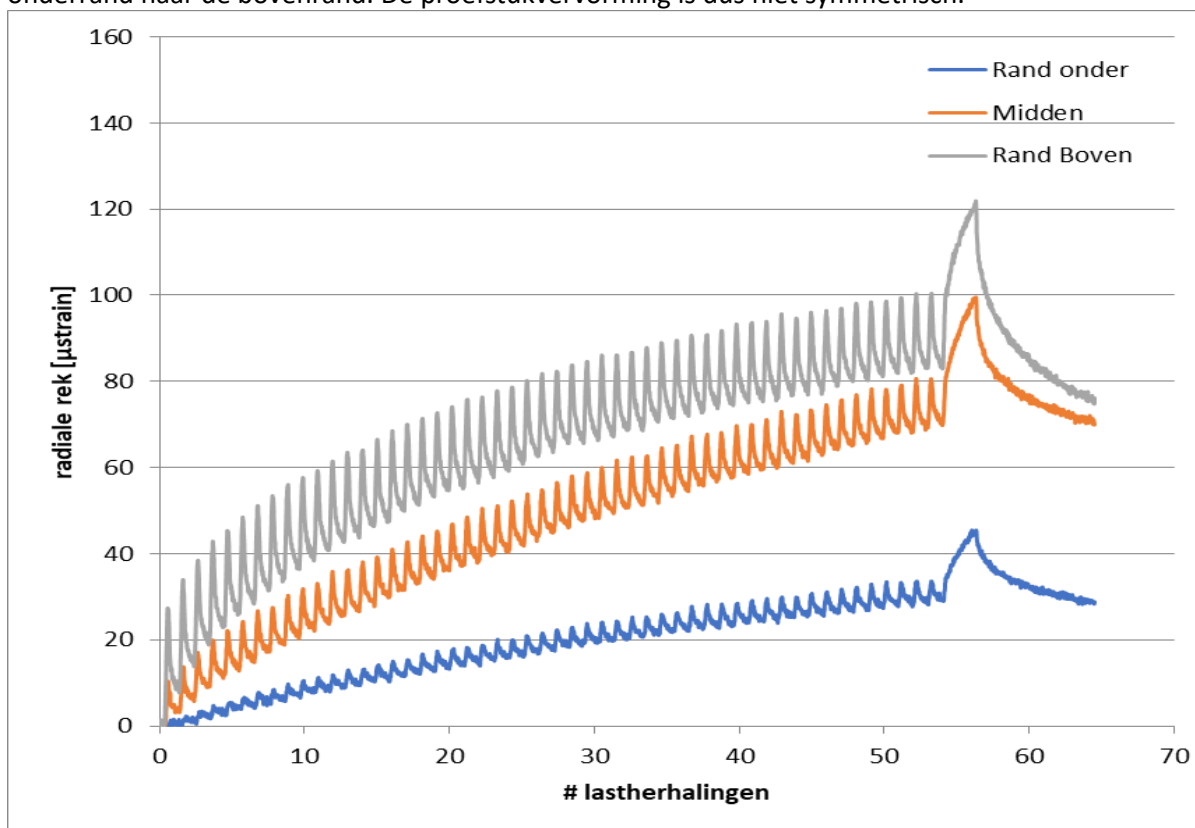


Figuur 4.5: Axiale permanente rek over het proefstuk, met 2*de standaardafwijking als foutenbalk

4.2.2 H=30 mm met Latex

Voor het proefstuk van 30 mm hoogte met twee lagen latex en vet ertussen, zijn de resultaten weergegeven in deze paragraaf.

Uit onderstaande figuur is te zien dat de rekken (zowel elastisch als plastisch) groter worden vanaf de onderrand naar de bovenrand. De proefstukvervorming is dus niet symmetrisch.



Figuur 4.6: Gemiddelde radiale rekstrooksignalen per hoogte bij H=30 mm met Latex

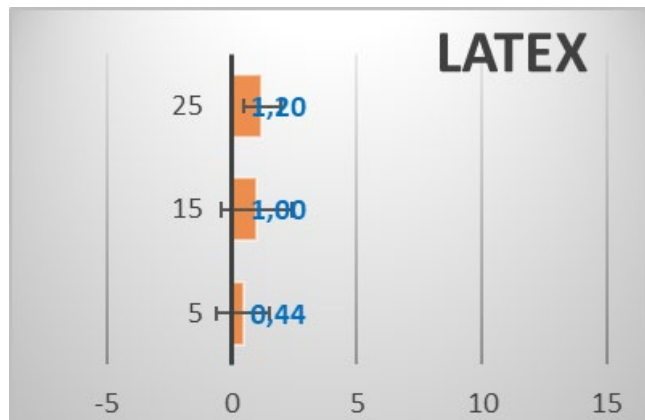
De plastische en elastische rekken bij $N=40$ (Tabel 4.3) laten ook zien dat de rek bij de onderplaat in beide gevallen kleiner is dan in het midden en dat die bij de bovenplaat groter zijn dan in het midden. De verhouding tussen elastische en plastische rekken is bij onderrand en in het midden gelijk. Bij de bovenrand is deze anders, wat wijst op niet symmetrisch gedrag over het proefstuk.

De elastische rek in het midden ligt redelijk in de buurt van de in paragraaf 3.4 bepaalde referentie waarde van $9 \mu\epsilon$.

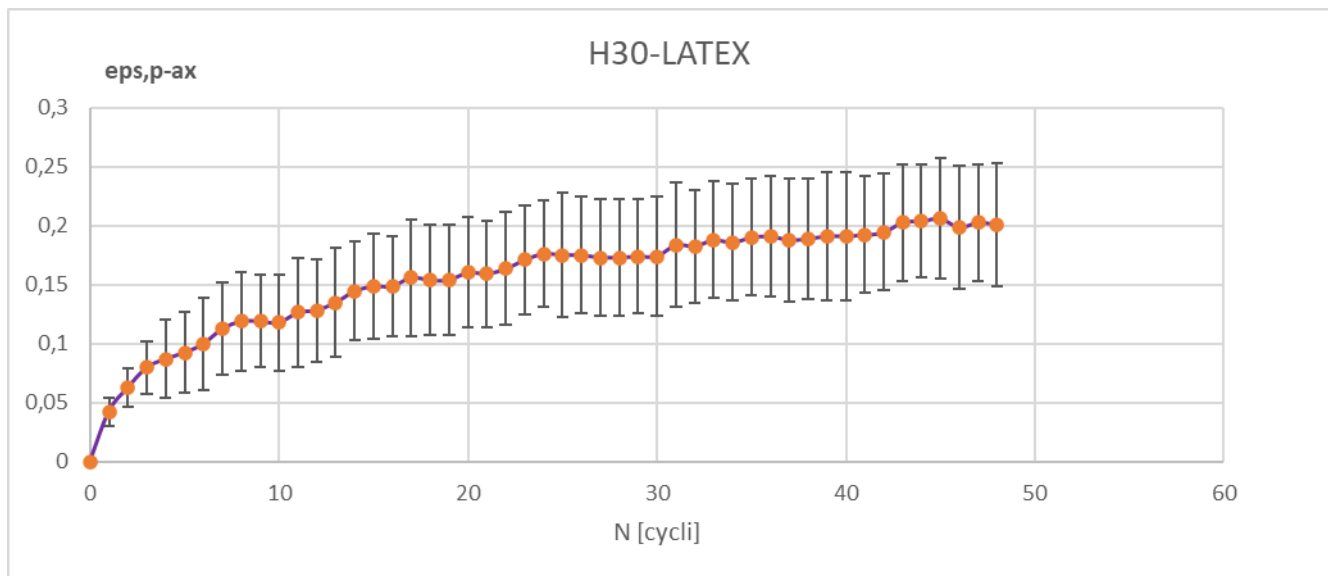
Tabel 4.3: Overzicht absolute en relatieve radiale rekken bij $N=40$ ($H=30$ mm, met Latex)

H=30		LATEX		
N=40		rand onder	midden	rand boven
eps,e		4,59	10,46	16,98
		0,44	1,00	1,62
eps,p		25,63	58,62	70,25
		0,44	1,00	1,20
eps,e/eps,p		0,18	0,18	0,24

Het vervormingspatroon over de hoogte laat zien dat het proefstuk over de hele hoogte in diameter toeneemt, waarbij de mate waarin dat gebeurt groter wordt richting de bovenkant.



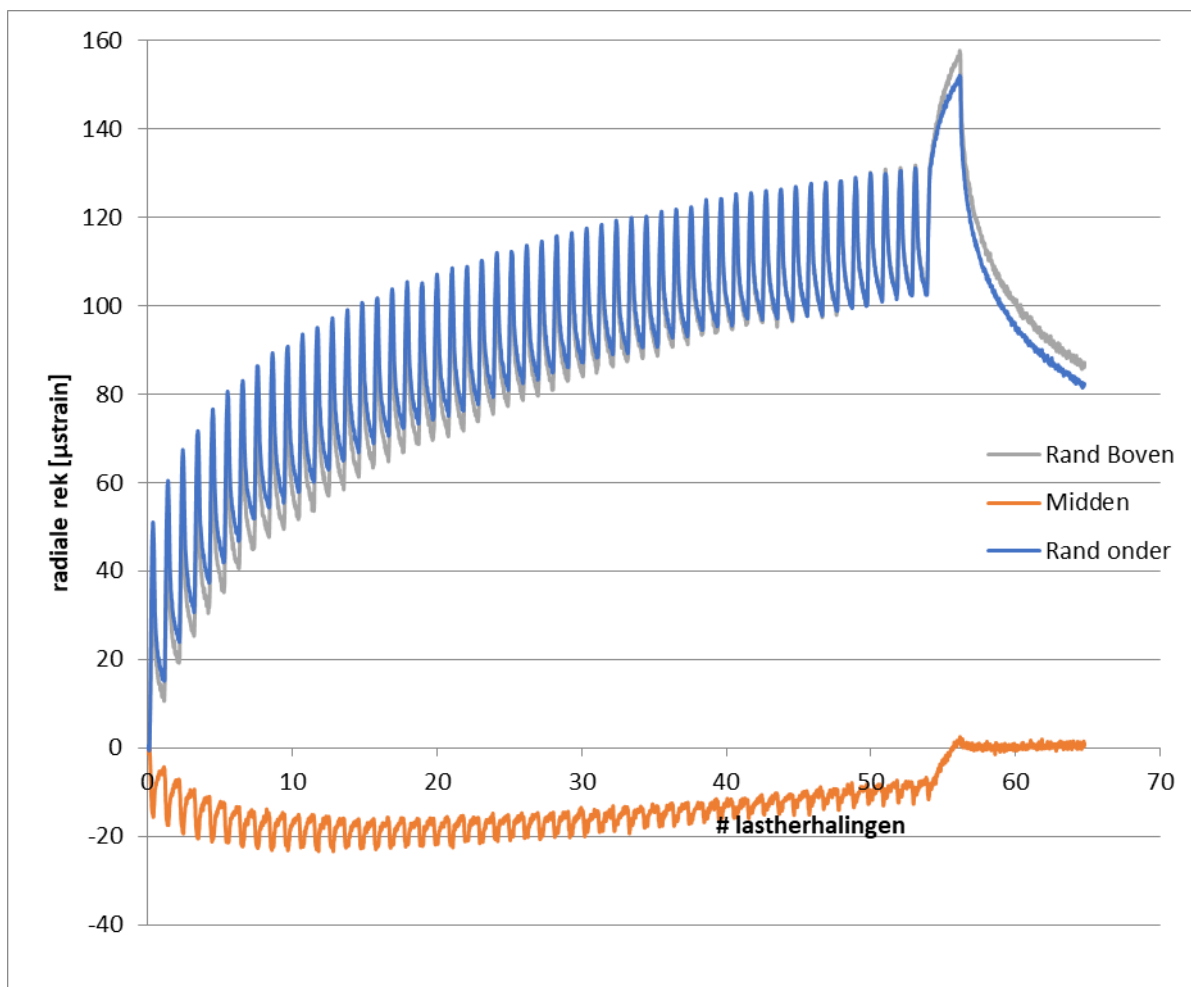
Figuur 4.7: Gemiddelde relatieve plastische radiale rek als functie van de hoogte van het proefstuk ($H=30$ mm, met Latex)



Figuur 4.8: Verloop gemiddelde permanente axiale rek als functie van het aantal lastherhalingen (H30 - Latex)

4.2.3 H=30 mm met Teflon

Voor het proefstuk van 30 mm met teflon als wrijvingsreductie zijn de resultaten als volgt. De totale rekken zijn bij de boven- en onderrand ongeveer gelijk en in het midden veel kleiner en negatief, dus de diameter neemt hier, tegen de verwachtingen in, af.



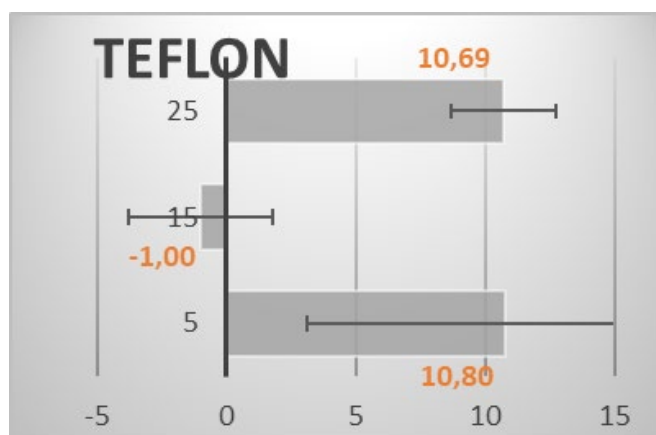
Figuur 4.9: Gemiddelde radiale rekstrooksignalen per hoogte H=30 mm met Teflon

Net als bij de meting zonder wrijvingsreductie (Geen) wordt in het midden zowel plastisch als elastisch een afname van de diameter gevonden.

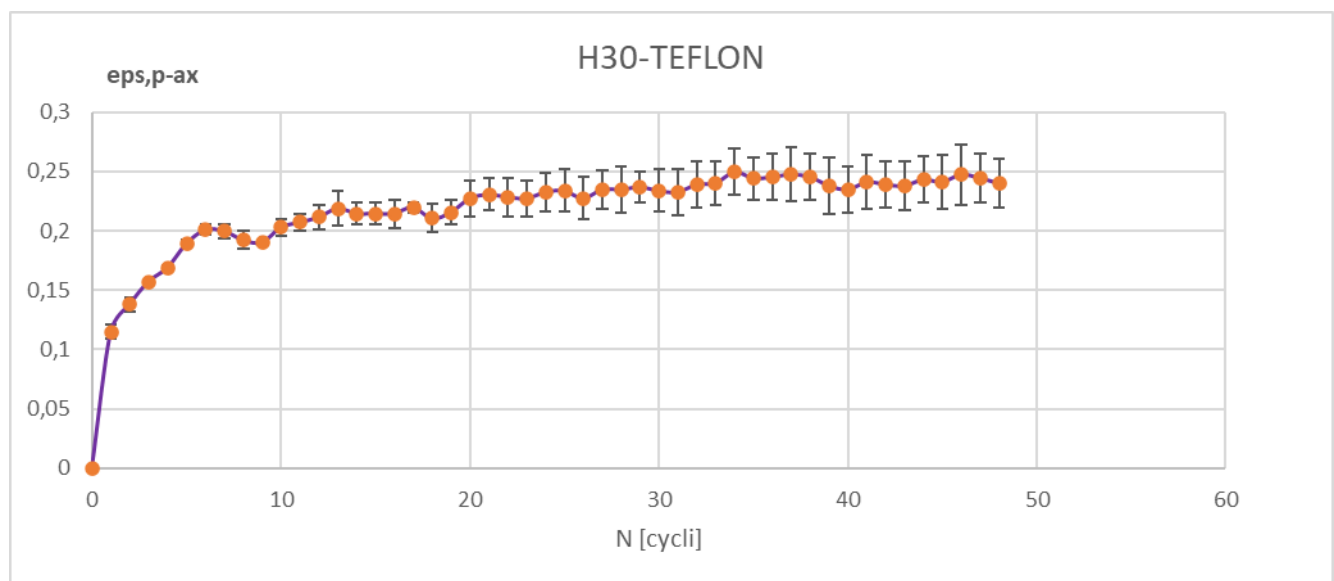
De elastische rek in het midden ligt qua grootte op de helft van de in paragraaf 3.4 bepaalde referentie waarde van $9 \mu\epsilon$, maar is anders van teken (de diameter wordt kleiner in plaats van groter). Aan boven- en onderzijde is de elastische rek 3 keer groter dan de referentie waarde.

Tabel 4.4: Overzicht absolute en relatieve radiale rekken bij N=40 (H=30 mm, met Teflon)

H=30	TEFLON		
N=40	rand onder	midden	rand boven
eps,e	28,46	-4,27	27,59
	6,66	-1,00	6,46
eps,p	97,74	-9,05	96,75
	10,80	-1,00	10,69
eps,e/eps,p	0,29	0,47	0,29



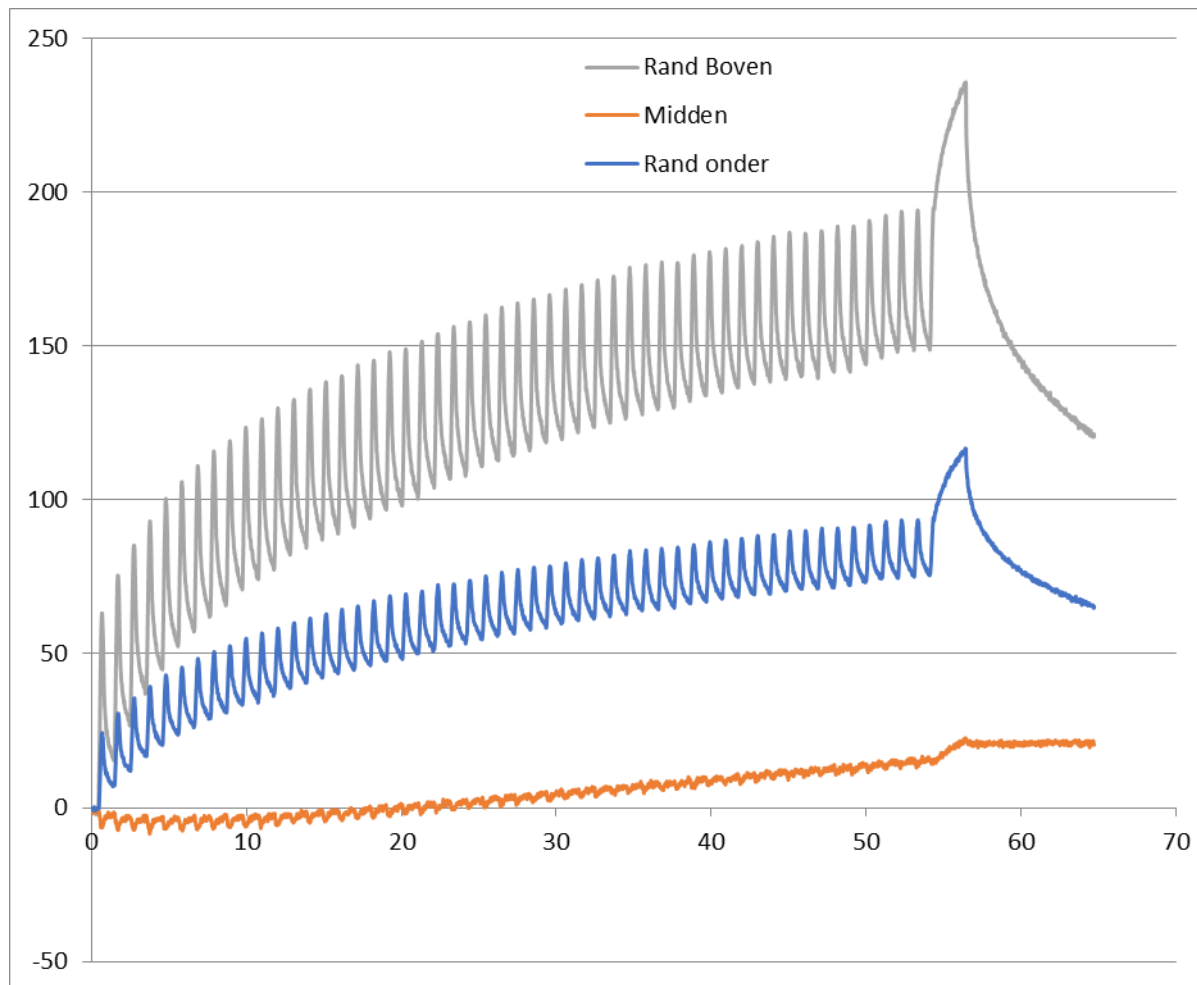
Figuur 4.10: Gemiddelde relatieve plastische radiale rek als functie van de hoogte van het proefstuk (H=30 mm, met Teflon)



Figuur 4.11: Verloop gemiddelde permanente axiale rek als functie van het aantal lastherhalingen (H30 - Teflon)

4.2.4 H=30 mm met Plastic folie

De resultaten voor het proefstuk van 30 mm hoogte met plasticfolie als wrijvingsreductie is hierna weergegeven.



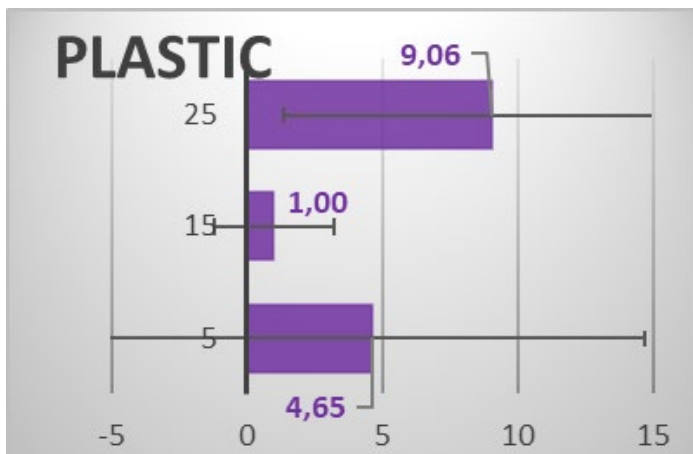
Figuur 4.12: Gemiddelde radiale rekstrooksignalen per hoogte bij H=30 mm, met Plastic folie

De rek, zowel elastisch als plastisch, is het kleinste in het midden en aanzienlijk groter aan de bovenrand dan aan de onderrand. De proefstukvervorming is dus niet symmetrisch. Dat is ook te zien in onderstaande tabel, waarbij opvalt dat vooral de elastische rek in het midden erg klein is.

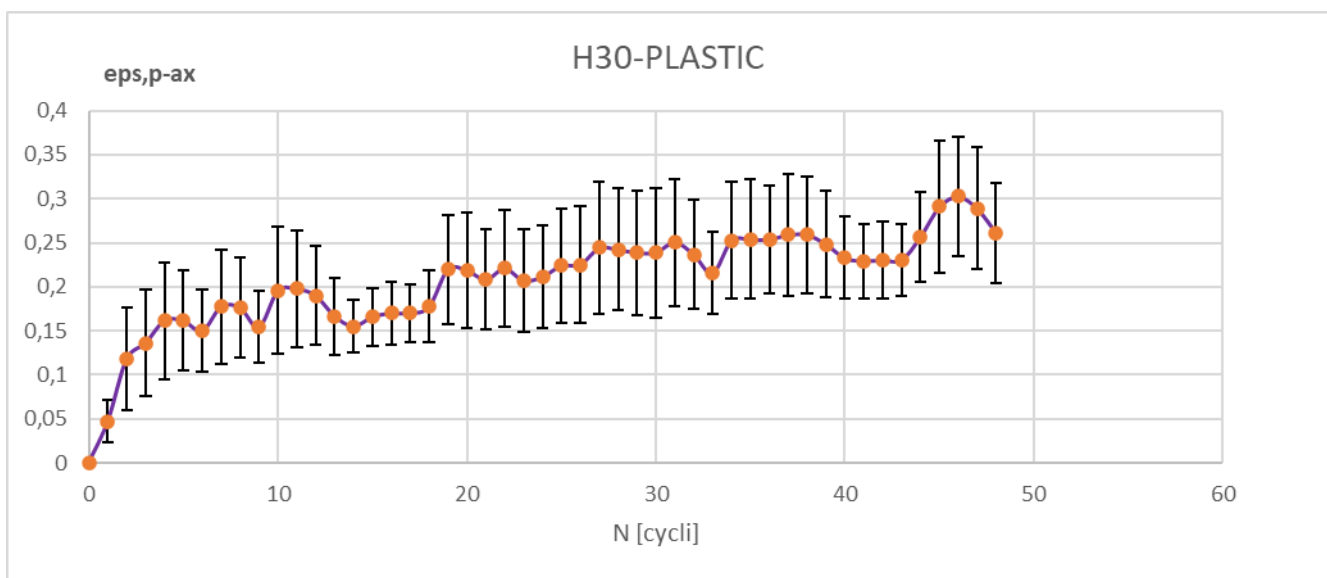
Tabel 4.5: Overzicht absolute en relatieve radiale rekken bij N=40 (H=30mm, met Plastic folie)

H=30	PLASTIC		
N=40	rand onder	midden	rand boven
eps,e	18,82	0,13	46,39
	148,35	1,00	365,77
eps,p	63,66	13,68	123,91
	4,65	1,00	9,06
eps,e/eps,p	0,30	0,01	0,37

Net als bij Latex is het vervormingspatroon asymmetrisch. De rek in het midden toont weliswaar geen afname, maar is wel erg klein, elastisch zelfs dicht bij nul. Dit is veel kleiner (bijna factor 100) dan de in paragraaf 3.4 bepaalde referentie waarde van $9 \mu\epsilon$. Bij de randen is de waarde juist (veel) groter.



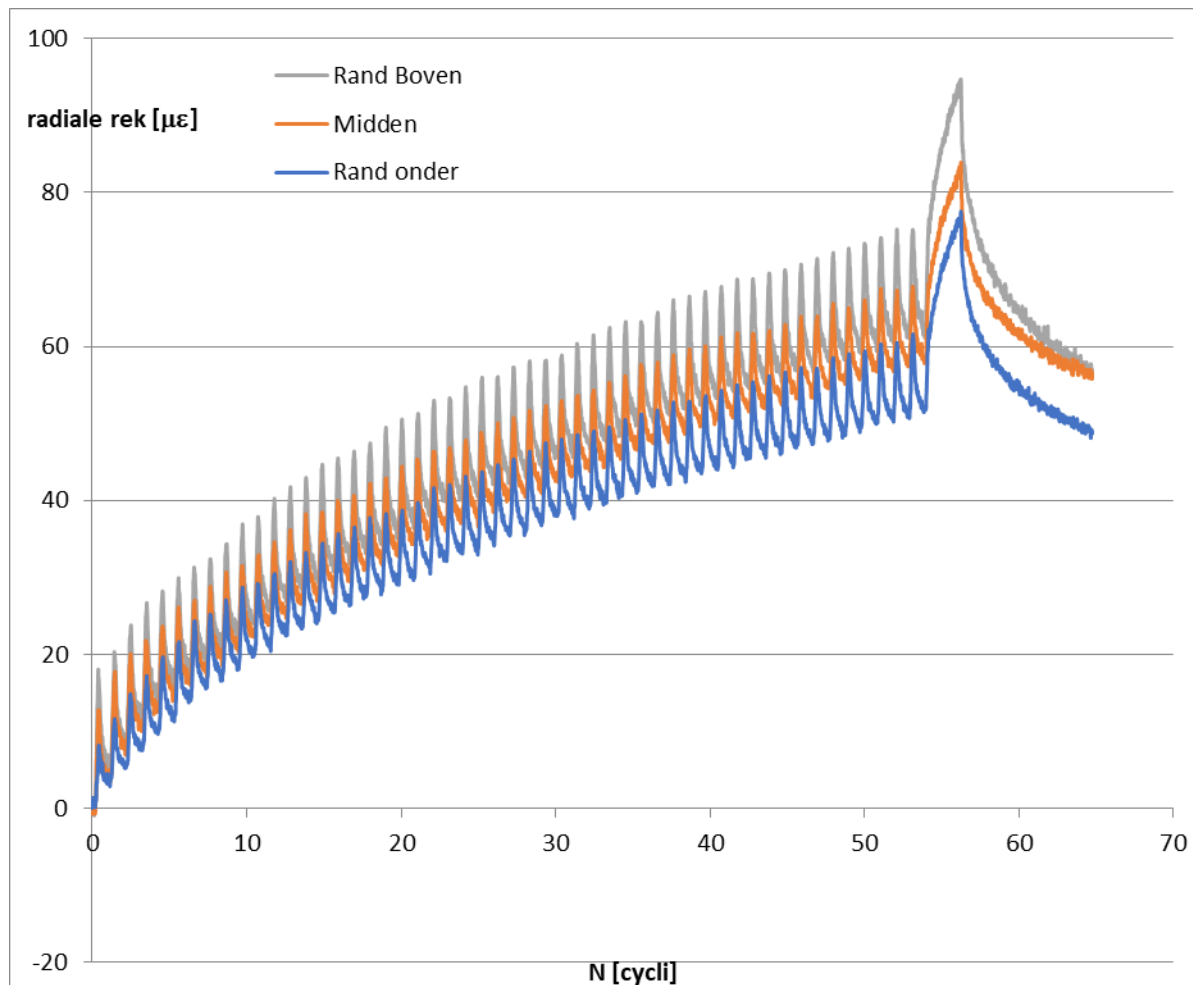
Figuur 4.13: Gemiddelde relatieve plastische radiale rek als functie van de hoogte van het proefstuk (H=30 mm, met Plastic folie)



Figuur 4.14: Verloop gemiddelde permanente axiale rek als functie van het aantal lastherhalingen (H30 - Plastic folie)

4.2.5 H=30 mm met Plastic folie op Teflon

De resultaten voor het proefstuk van 30 mm met als wrijvingsreductie systeem plastic folie op een teflonplaatje worden hierna gegeven. Zoals hieronder te zien is, verlopen de resultaten voor de radiale rek over de hoogte, maar liggen ze aanzienlijk dicht bij elkaar dan bij de andere wrijvingsreductiesystemen bij deze hoogte.



Figuur 4.15: Gemiddelde radiale rekstrooksignalen per hoogte bij H=30 mm, met Plastic folie op Teflon

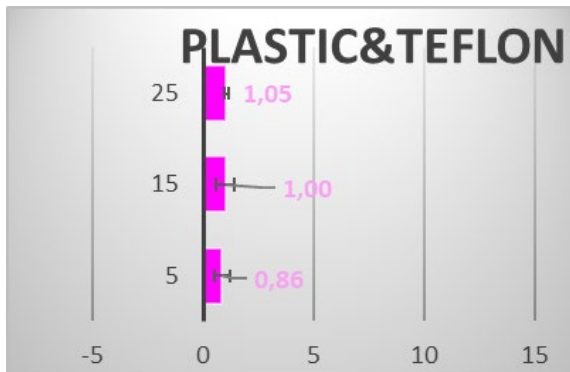
Zoals in de tabel te zien is, is het verloop van de radiale plastische rek over de hoogte beperkt. De elastische rekken zijn (in puls 40) bij beide randen groter dan in het midden. Wat bijzonder is dat hoewel de verhouding elastische-plastische rek bij de randen ongeveer gelijk is, de absolute waarde onder ongeveer driekwart bedraagt van die bij de bovenplaat. De elastische rek in het midden ligt relatief dicht bij de waarde voor de onderplaat, terwijl de plastische rek in het midden in de buurt van de waarde van de bovenplaat ligt.

Tabel 4.6: Overzicht absolute en relatieve radiale rekken bij N=40 (H=30 mm, met Plastic folie op Teflon)

H=30	Plastic&Teflon		
N=40	rand onder	midden	rand boven
eps,e	9,68	9,13	12,89
	1,06	1,00	1,41
eps,p	45,05	52,34	54,90
	0,86	1,00	1,05
eps,e/eps,p	0,21	0,17	0,23

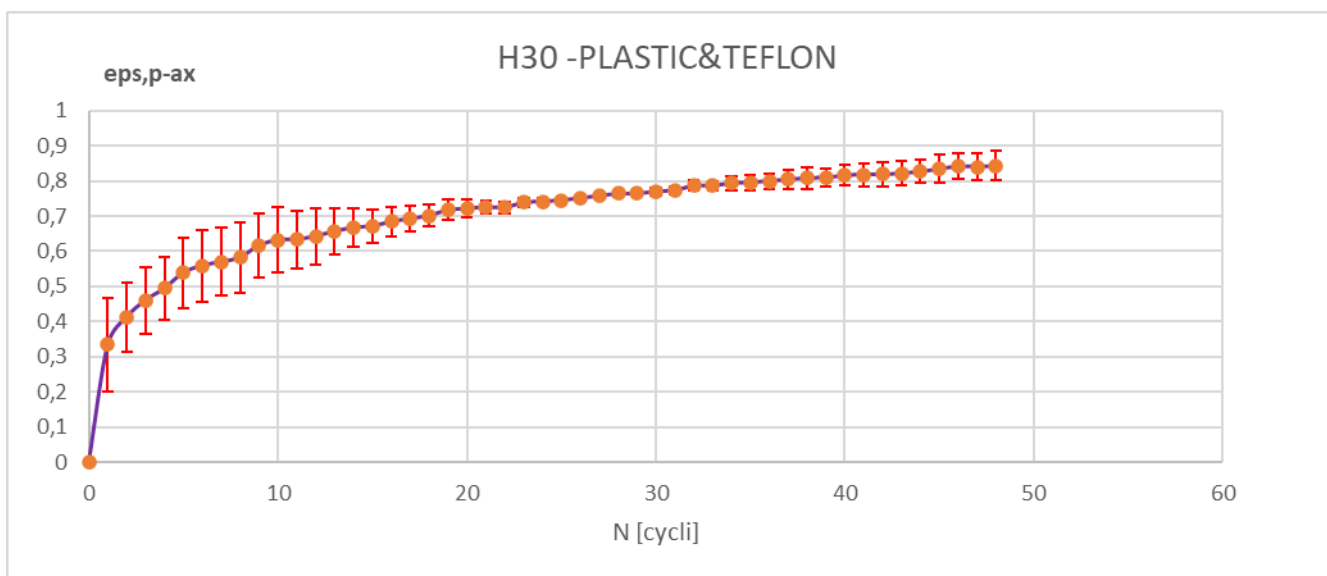
De elastische rek in het midden ligt redelijk in de buurt van de in paragraaf 3.4 bepaalde referentie waarde van 9 µε en dat geldt ook voor de elastische rek bij de onderplaat. Die bij de bovenplaat is groter, maar dit is het enige systeem dat bij H=30 mm in de buurt van de referentie waarde komt.

In de grafische weergave van de plastische radiale rek is te zien dat die toeneemt van de onderplaat naar boven, maar wel in beperkte mate.



Figuur 4.16: Gemiddelde relatieve plastische radiale rek als functie van de hoogte van het proefstuk (H=30 mm, met Plastic folie op Teflon)

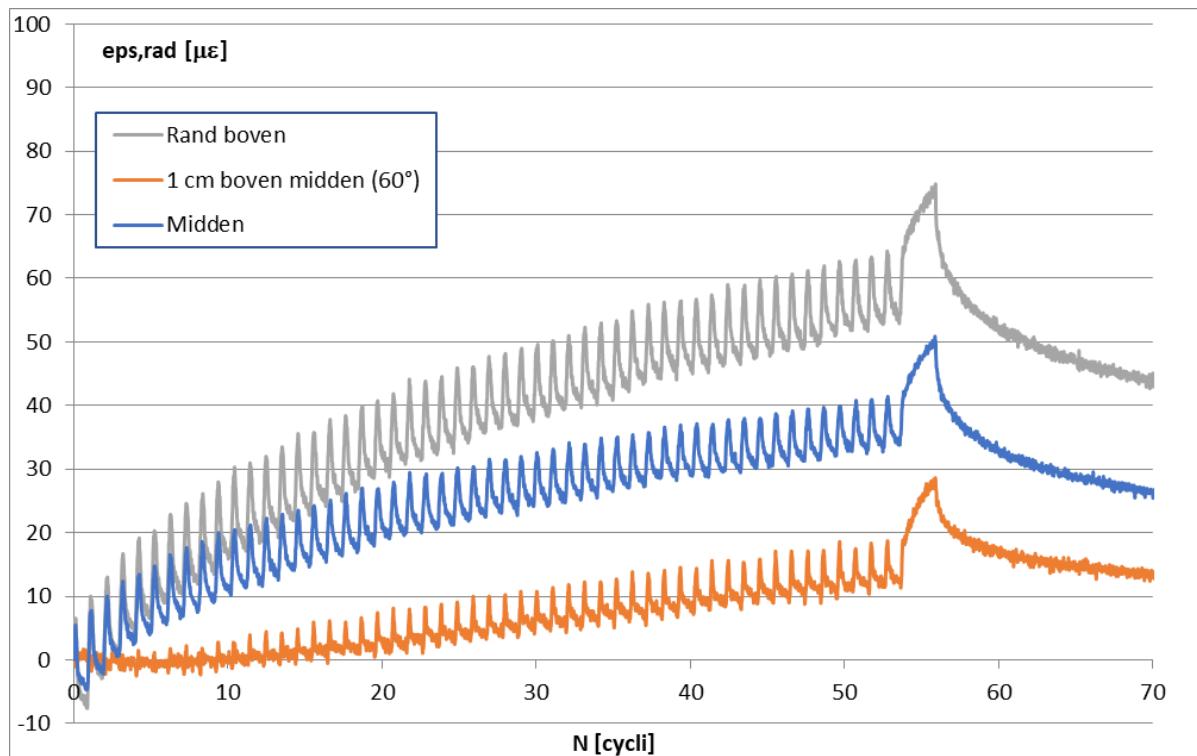
Bij het verloop van de axiale permanente rek valt vooral het verloop in de foutenbalken op, wat erop wijst dat de verschillen tussen de LVDTs verlopen gedurende de proef.



Figuur 4.17: Verloop gemiddelde permanente axiale rek als functie van het aantal lastherhalingen (H30 – Plastic folie op Teflon)

4.2.6 H=60 mm, geen wrijvingsreductie

Uit de gemiddelde totale radiale rekstrooksignalen is te zien dat de vervorming 10 mm boven het midden van het proefstuk het kleinste is en ook wat vreemd verloopt aan het begin. De twee andere reksignalen lopen aan het begin gelijk en gaan daarna afwijken. De opmerking 60° in de legende achter de rekstroken op 10 mm boven het midden wijzen erop dat deze versprongen aangebracht zijn ten opzichte van de rekstroken op de andere twee hoogtes (andere verticaal).



Figuur 4.18: Gemiddelde radiale rekstrooksignalen per hoogte bij H=60 mm zonder wrijvingsreductie

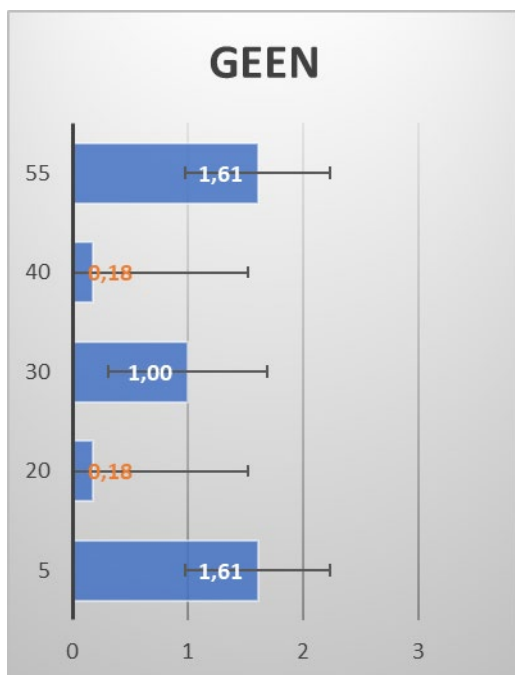
In Tabel 4.7 zijn de numerieke waarden bij puls 40 gegeven. In tegenstelling tot het proefstuk met hoogte 30 mm, heeft dit proefstuk (en de andere, nog hogere proefstukken) alleen rekstroken vanaf het midden omhoog. De laagste rekstroken zitten dus op het midden, dan 10 mm daarboven en 5 mm onder de bovenrand van het proefstuk. De radiale rek, zowel elastisch als plastisch, is aan de rand groter dan in het midden maar de verhouding tussen beiden is min of meer gelijk. Vooral de plastische radiale rek wijkt 10 mm boven het midden flink af, de elastische valt nog wel mee.

Tabel 4.7: Gemiddelde radiale elastische en plastische rekken [$\mu\epsilon$] per hoogte, absoluut en relatief t.o.v. de (absolute waarde van) de rek in het midden van het proefstuk

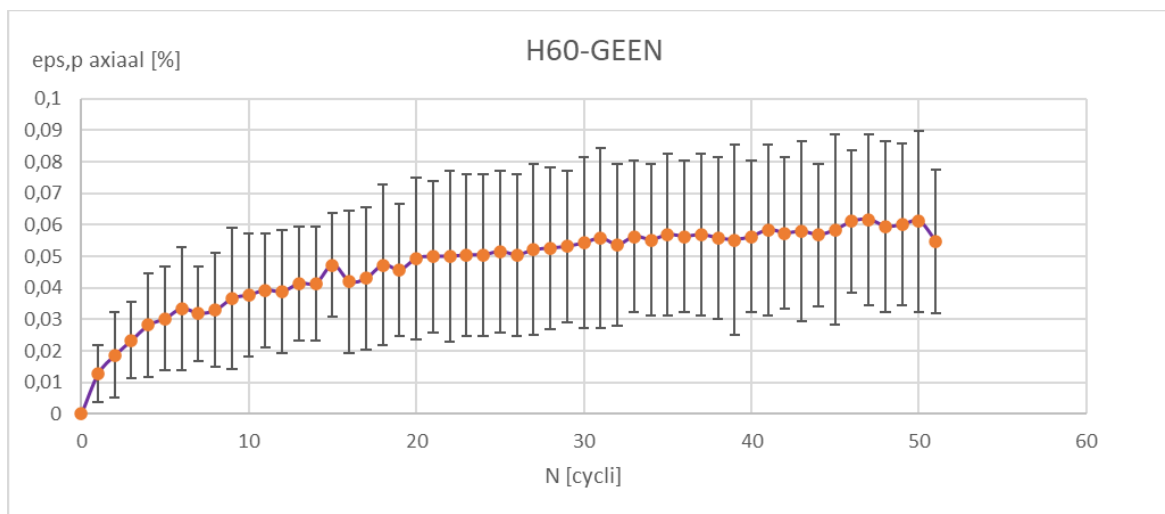
H=60	GEEN		
N=40	Midden (M)	M+10mm	rand-5mm
eps,e	8,01	6,54	11,61
	1,00	0,82	1,45
eps,p	37,70	6,68	60,65
	1,00	0,18	1,61
eps,e/eps,p	0,21	0,98	0,19

De elastische rek in het midden ligt redelijk in de buurt van de in paragraaf 3.4 bepaalde referentie waarde van $9 \mu\epsilon$, voor M+10 mm is de waarde wat lager en voor de rand wat hoger.

Omdat op de onderste helft van het proefstuk geen rekstroken zitten, worden de reksignalen gespiegeld over de hoogte om een beeld van de vorm van het proefstuk (plastische deformatie) te geven (Figuur 4.19).



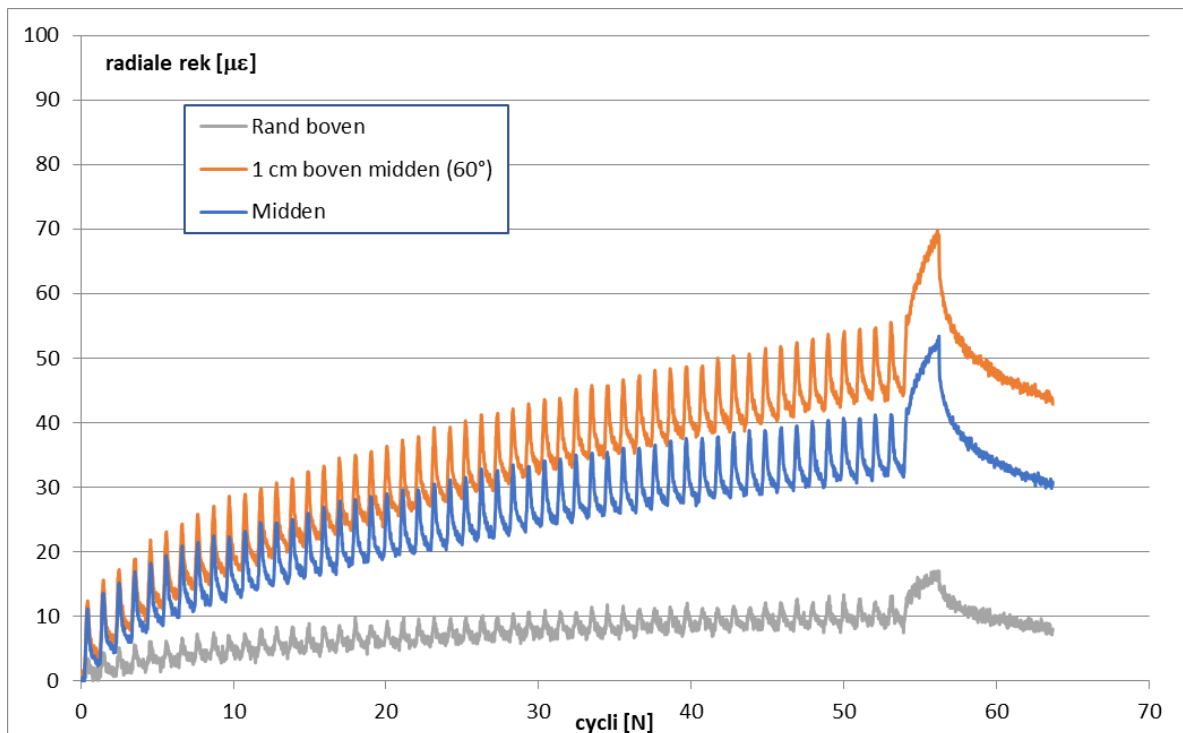
Figuur 4.19: Gemiddelde relatieve plastische radiale rek als functie van de hoogte van het proefstuk



Figuur 4.20: Axiale permanente rek over het proefstuk, met 2*de standaardafwijking als foutenbalk

4.2.7 H=60 mm met Latex

Voor het proefstuk van 60 mm hoogte met twee lagen latex en vet ertussen, zijn de resultaten als volgt:



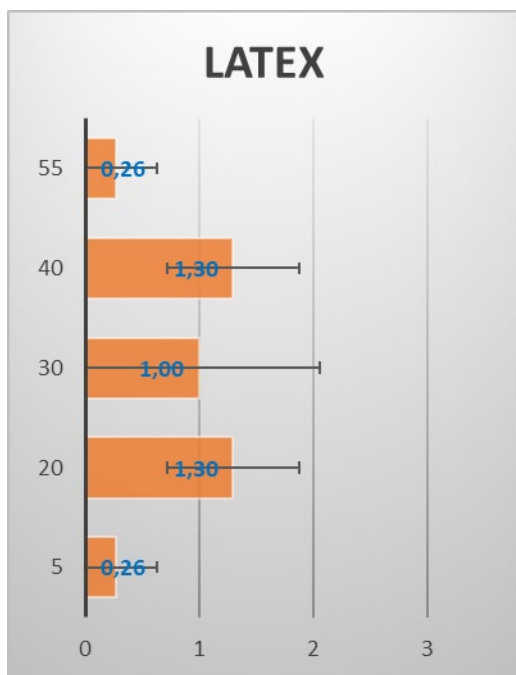
Figuur 4.21: Gemiddelde radiale rekstrooksignalen per hoogte bij H=60 mm met Latex

Bij deze configuratie is de horizontale rek het kleinste bij de plaat en het grootst net boven het midden. De verhouding tussen elastische en plastische rek is voor alle drie de locaties ongeveer gelijk. De verhouding tussen midden en rand is zelfs exact hetzelfde hoewel de absolute waarden zelf flink verschillen.

Tabel 4.8: Overzicht absolute en relatieve radiale rekken bij N=40 (H=60 mm, met Latex)

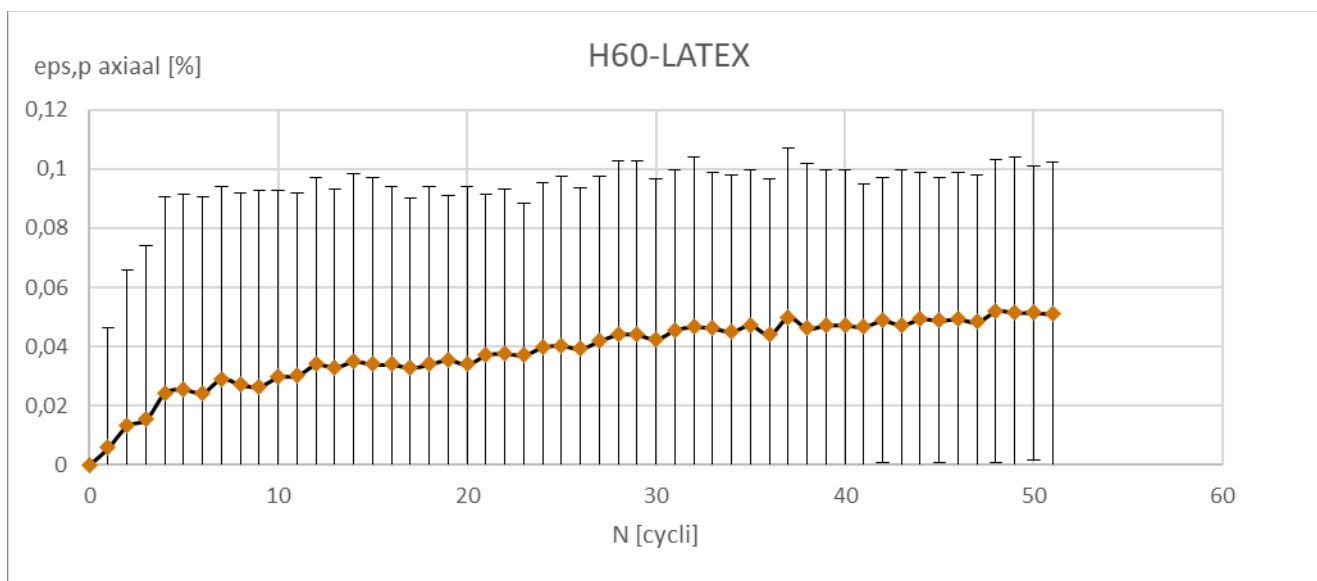
H=60	LATEX		
N=40	Midden (M)	M+10mm	rand-5mm
eps,e	9,14	9,68	2,44
	1,00	1,06	0,27
eps,p	28,06	36,39	7,42
	1,00	1,30	0,26
eps,e/eps,p	0,33	0,27	0,33

De elastische rek in het midden ligt redelijk in de buurt van de in paragraaf 3.4 bepaalde referentie waarde van $9 \mu\epsilon$, ook M+10 mm zit in dezelfde range maar bij de rand is er een flinke afwijking.



Figuur 4.22: Gemiddelde plastische relatieve radiale rek als functie van de hoogte van het proefstuk (H=60 mm, met Latex)

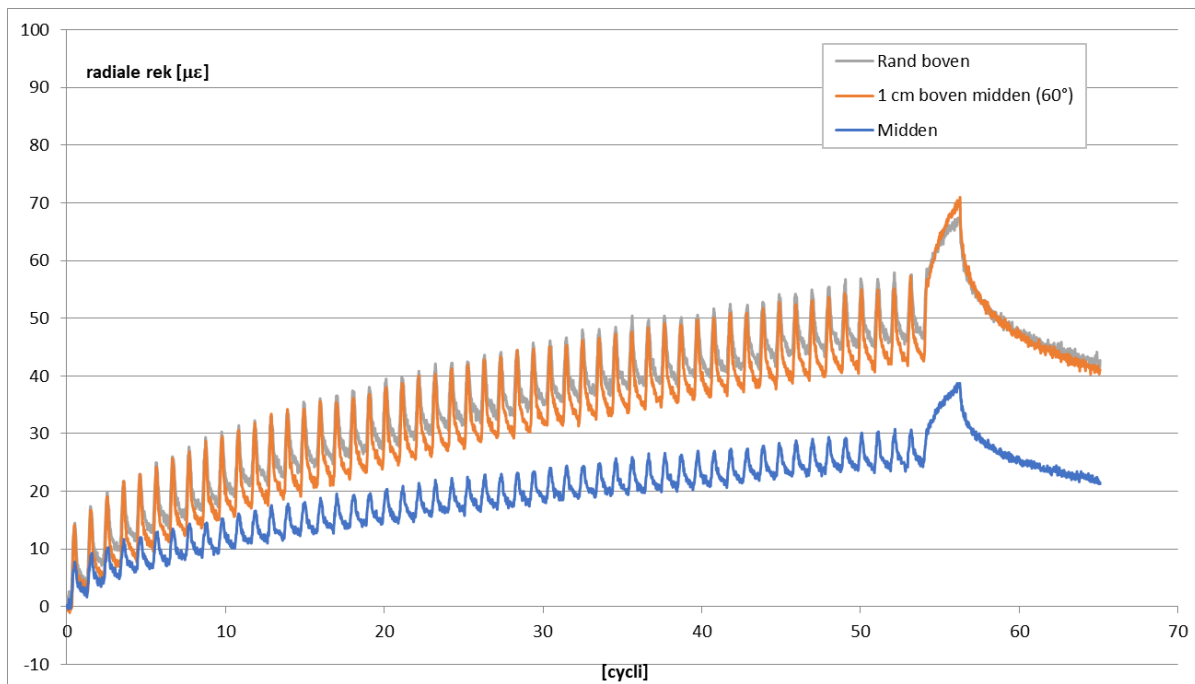
De axiale permanente rek is klein en vertoont veel variatie.



Figuur 4.23: Verloop gemiddelde permanente axiale rek als functie van het aantal lastherhalingen (H60-Latex)

4.2.8 H=60 mm met Teflon

Voor het proefstuk van 60 mm met teflon als wrijvingsreductie is de radiale rek in het midden kleiner dan bij de rand; de signalen 10 mm uit het midden en aan de rand tonen veel overeenkomst.



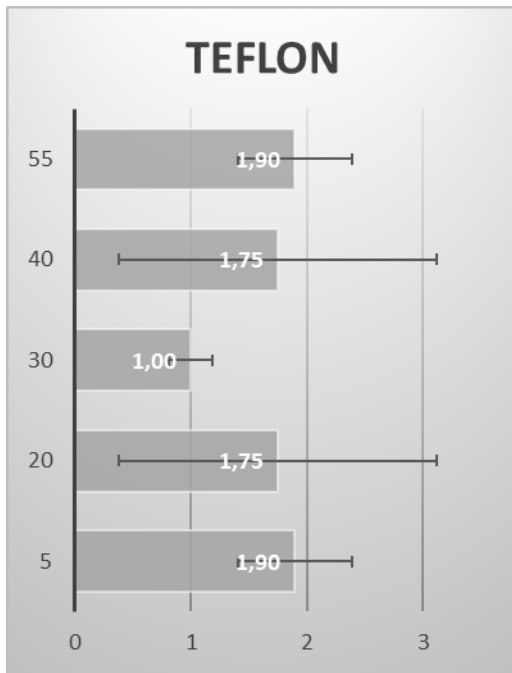
Figuur 4.24: Gemiddelde radiale rekstrooksignalen per hoogte bij H=60 mm met Teflon

Dit geldt zowel voor de elastische als plastische radiale rek en de verhouding tussen beiden ligt voor alle hoogtes rond de 0,3.

Tabel 4.9: Overzicht absolute en relatieve radiale rekken bij N=40 (H=60 mm, met Teflon)

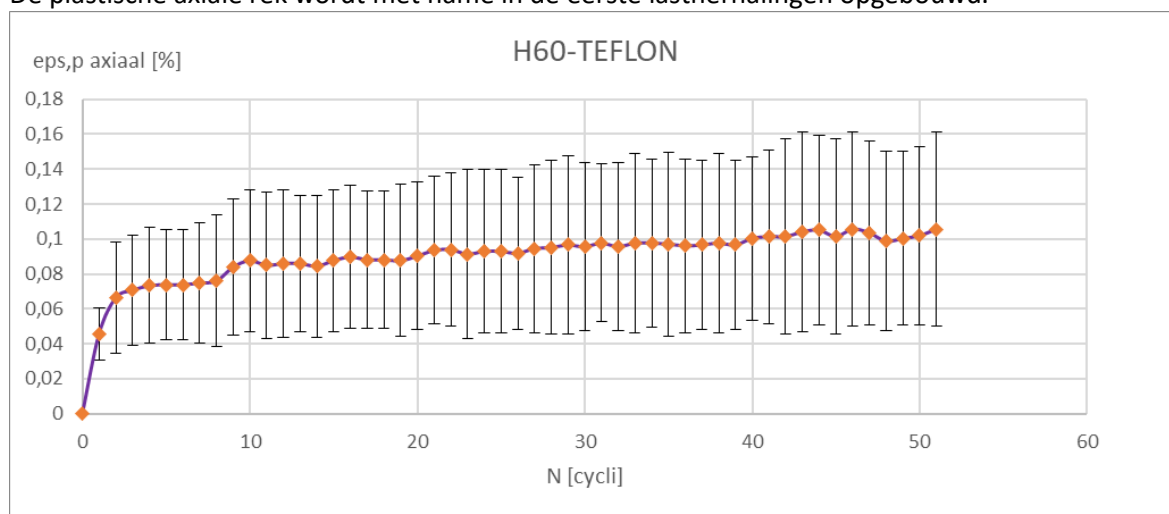
H=60	TEFLON		
N=40	Midden (M)	M+10mm	rand-5mm
eps,e	5,37	12,30	10,64
	1,00	2,29	1,98
eps,p	21,01	36,79	39,84
	1,00	1,75	1,90
eps,e/eps,p	0,26	0,33	0,27

De elastische rek in het midden ligt lager dan de in paragraaf 3.4 bepaalde referentie waarde van $9 \mu\epsilon$, M+10 mm ligt hoger en de rand waarde ligt in de buurt, dit in tegenstelling tot de resultaten voor Latex in de vorige paragraaf.



Figuur 4.25: Gemiddelde relatieve plastische radiale rek als functie van de hoogte van het proefstuk (H=60 mm met Teflon)

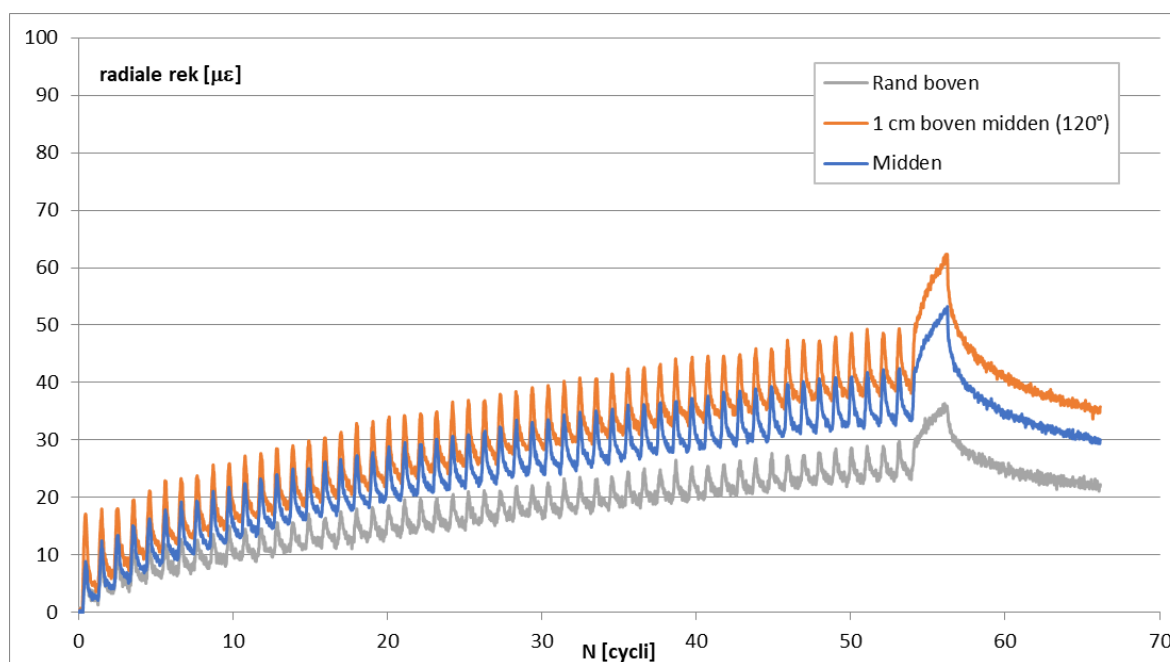
De plastische axiale rek wordt met name in de eerste lastherhalingen opgebouwd.



Figuur 4.26: Verloop gemiddelde permanente axiale rek als functie van het aantal lastherhalingen (H60-Teflon)

4.2.9 H=60 mm met Plasticfolie

De resultaten voor H=60 mm met plastic folie als wrijvingsreductie zijn als volgt.

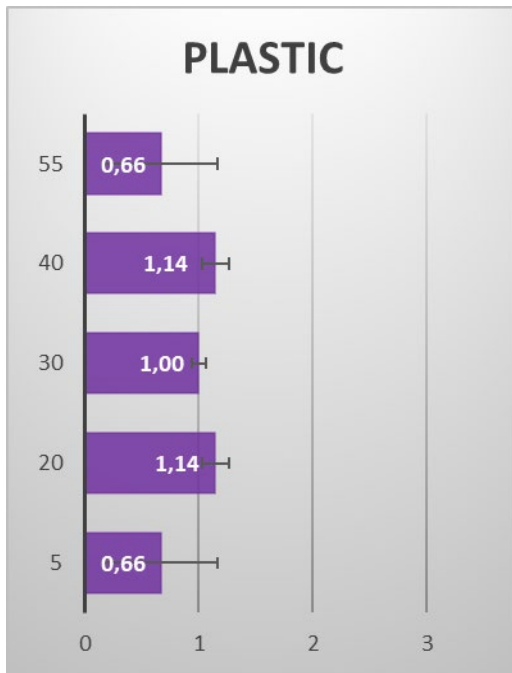


Figuur 4.27: Gemiddelde radiale reksignalen per hoogte bij H=60 mm met Plastic folie

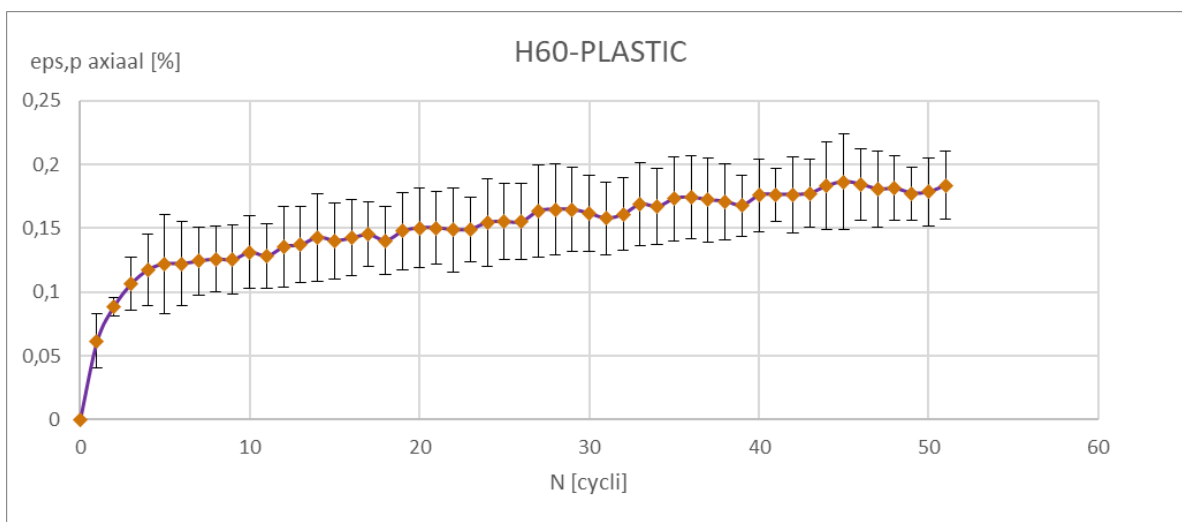
De elastische rekken in het midden en op M+10 mm liggen redelijk in de buurt van de in paragraaf 3.4 bepaalde referentie waarde van $9 \mu\epsilon$; aan de rand zijn deze een stuk kleiner.

Tabel 4.10: Overzicht absolute en relatieve radiale rekken bij N=40 (H=60 mm met Plastic folie)

H=60	PLASTIC		
N=40	Midden (M)	M+10mm	rand-5mm
eps,e	8,15	10,70	4,00
	1,00	1,31	0,49
eps,p	29,13	33,34	19,35
	1,00	1,14	0,66
eps,e/eps,p	0,28	0,32	0,21

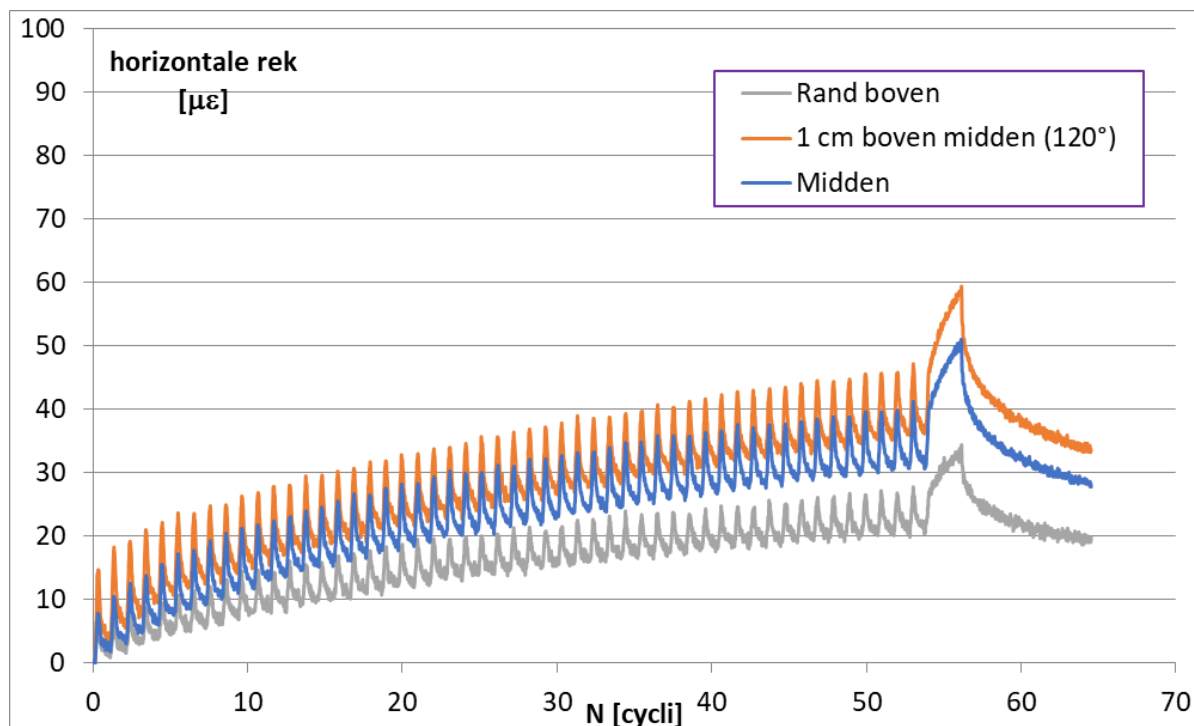


Figuur 4.28: Gemiddelde relatieve plastische radiale rek als functie van de hoogte van het proefstuk (H=60 mm, met Plastic folie)



Figuur 4.29: Verloop gemiddelde permanente axiale rek als functie van het aantal lastherhalingen (H60- Plastic folie)

4.2.10 H=60 mm met Plastic folie op Teflon



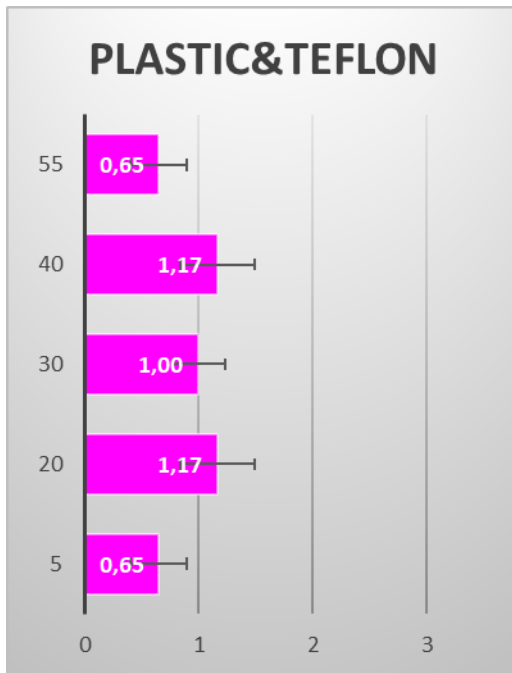
Figuur 4.30: Gemiddelde radiale reksignalen per hoogte bij H=60 mm met Plasticfolie op Teflon

De elastische rek in het midden en voor M+10 mm ligt redelijk in de buurt van de in paragraaf 3.4 bepaalde referentie waarde van $9 \mu\epsilon$, de waarde bij de rand is ongeveer $2/3$ daarvan.

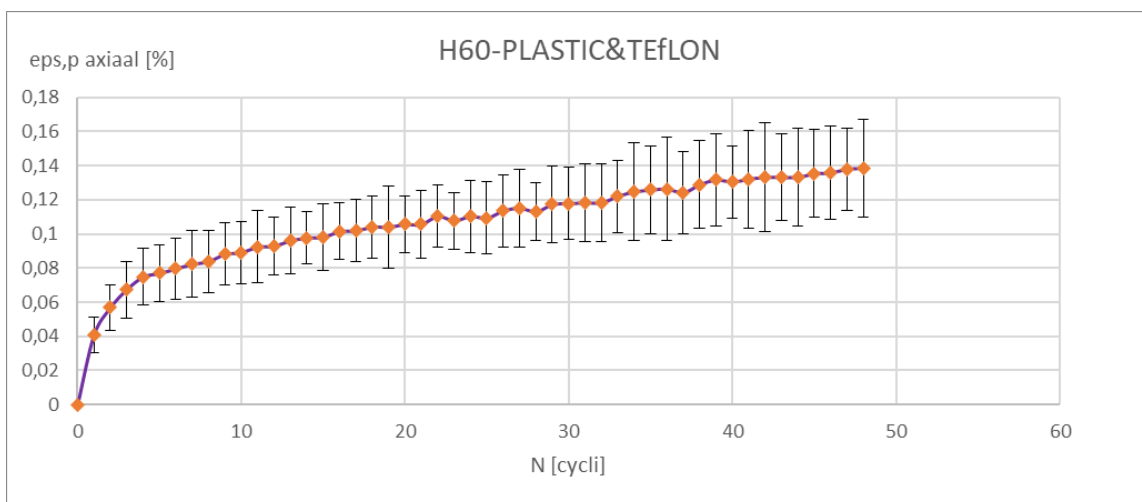
Tabel 4.11: Overzicht absolute en relatieve radiale rekken bij N=40 (H=60 mm met Plastic folie op Teflon)

H=60	PLASTIC&TEFLON		
N=40	Midden (M)	M+10mm	rand-5mm
eps,e	9,30	9,81	6,19
	1,00	1,05	0,67
eps,p	28,15	32,87	18,33
	1,00	1,17	0,65
eps,e/eps,p	0,33	0,30	0,34

Grafisch ziet dat er voor de plastische rekken als volgt uit:

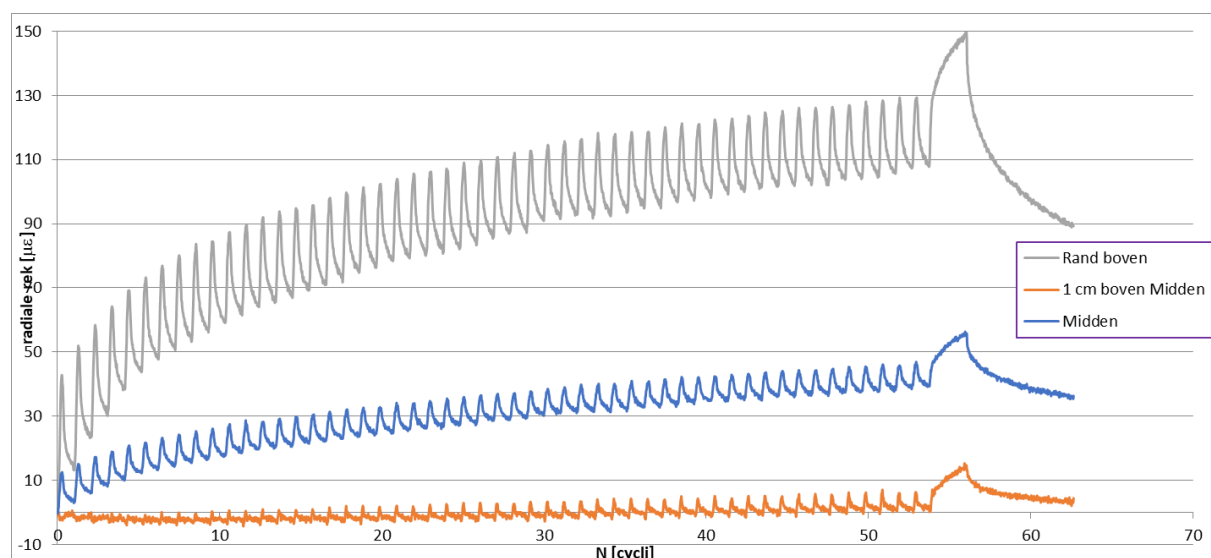


Figuur 4.31: Gemiddelde relatieve plastische radiale rek geplot over de hoogte van het proefstuk (H=60 mm met Plastic folie op Teflon)



Figuur 4.32: Verloop gemiddelde permanente axiale rek als functie van het aantal lastherhalingen (H60 - Plasticfolie op Teflon)

4.2.11 H=80 mm, geen wrijvingsreductie

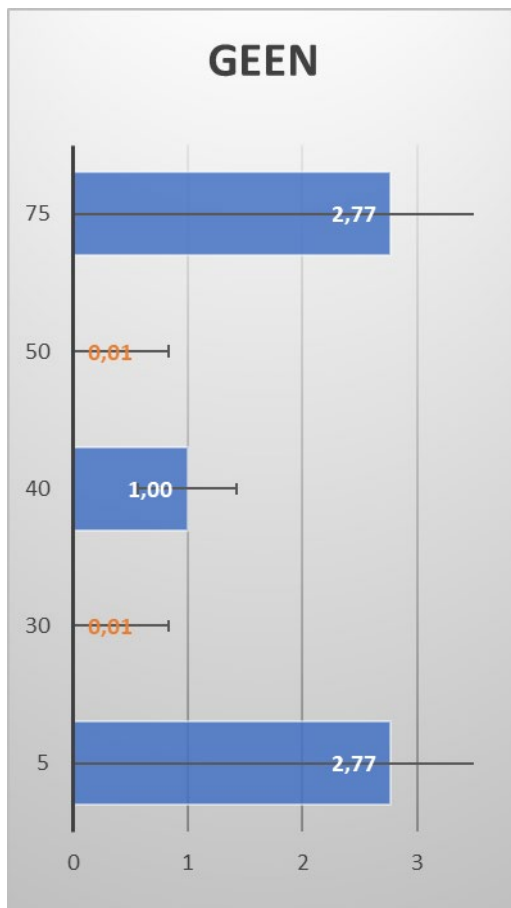


Figuur 4.33: Gemiddelde radiale rekstrooksignalen per hoogte met H=80 mm zonder wrijvingsreductie

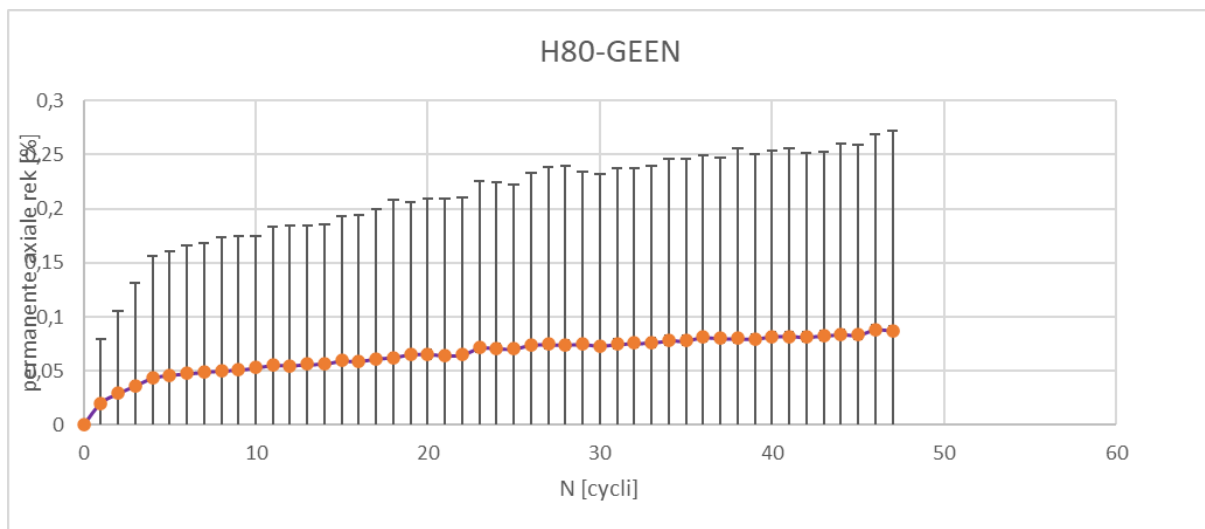
De elastische rek in het midden komt enigszins in de buurt van de in paragraaf 3.4 bepaalde referentie waarde van $9 \mu\epsilon$, M+10 mm is kleiner (ca de helft) en de rand juist veel groter (ruim twee keer zo groot).

Tabel 4.12: Gemiddelde radiale elastische en plastische rekken [$\mu\epsilon$] per hoogte, absoluut en relatief t.o.v. de (absolute waarde van) de rek in het midden van het proefstuk

H=80 GEEN			
N=40	Midden (M)	M+10mm	rand-5mm
eps,e	7,56	4,25	22,53
	1,00	0,56	2,98
eps,p	36,62	0,50	101,46
	1,00	0,01	2,77
eps,e/eps,p	0,21	8,54	0,22



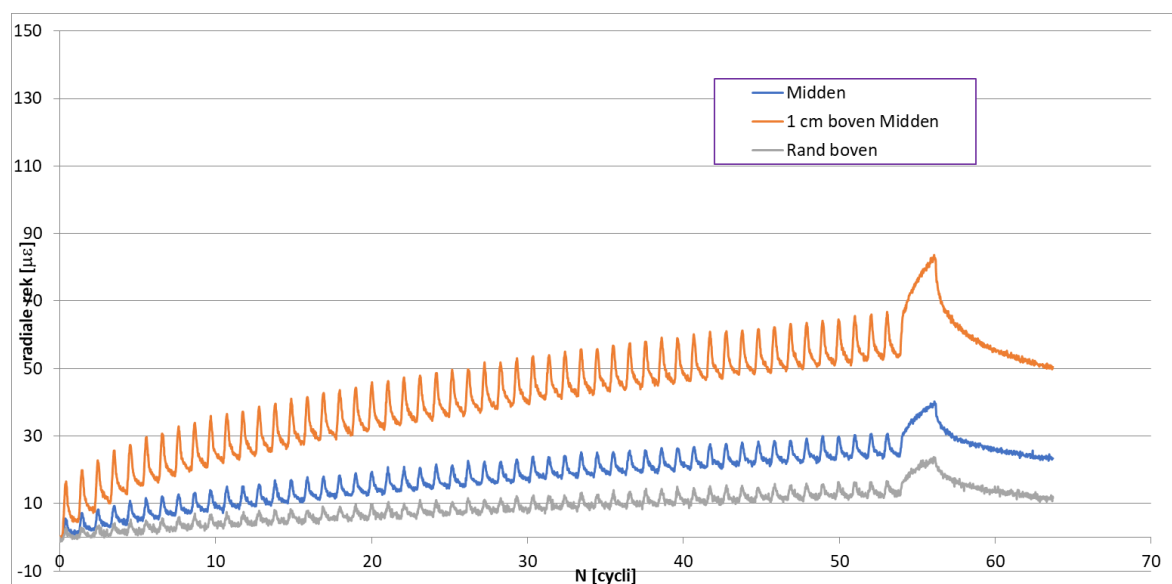
Figuur 4.34: Gemiddelde relatieve radiale plastische rekken als functie van de hoogte



Figuur 4.35: Axiale permanente rek over het proefstuk, met 2*de standaardafwijking als foutenbalk

4.2.12 H=80 mm met Latex

Voor het proefstuk met hoogte van 80 mm met twee lagen latex en vet ertussen, zijn de resultaten als volgt.

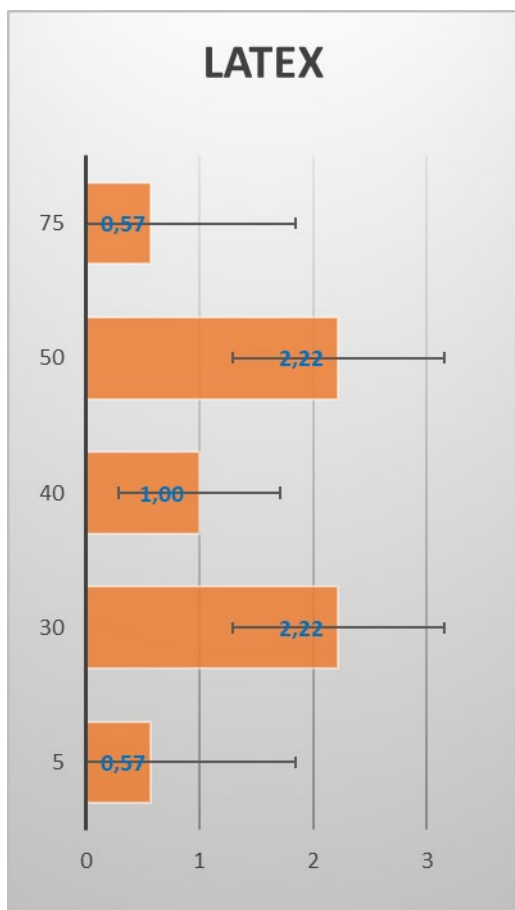


Figuur 4.36: Gemiddelde radiale rekstrooksignalen per hoogte bij H=80 mm met Latex

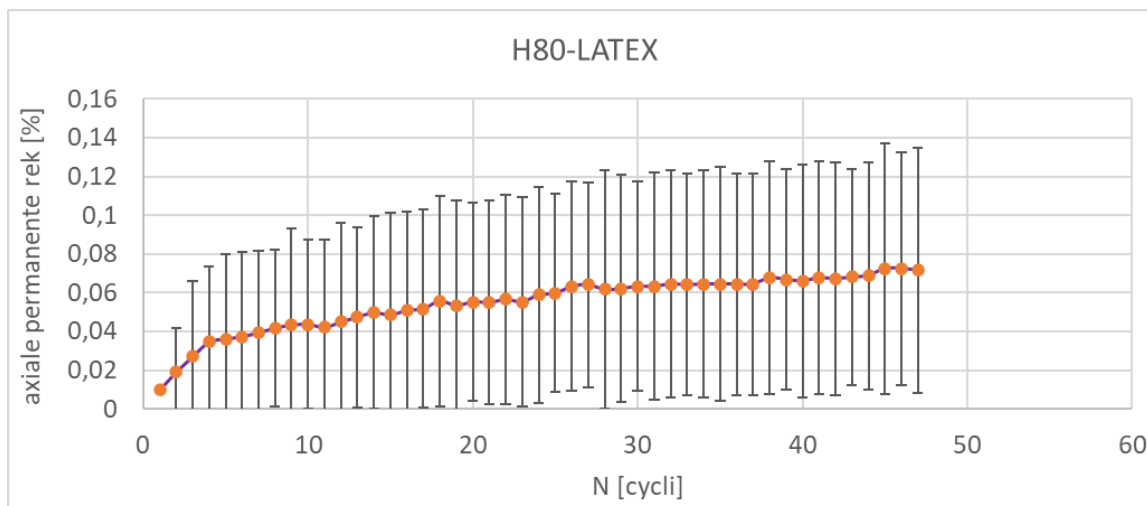
De elastische rek in het midden is kleiner dan de in paragraaf 3.4 bepaalde referentie waarde van $9 \mu\epsilon$, M+10mm is ongeveer evenveel groter en de waarde bij de rand is heel klein.

Tabel 4.13: Overzicht absolute en relatieve radiale rekken bij N=40 (H=80 mm, met Latex)

H=80	LATEX		
N=40	Midden (M)	M+10mm	rand-5mm
eps,e	6,29	12,95	3,61
	1,00	2,06	0,57
eps,p	21,95	48,72	12,45
	1,00	2,22	0,57
eps,e/eps,p	0,29	0,27	0,29



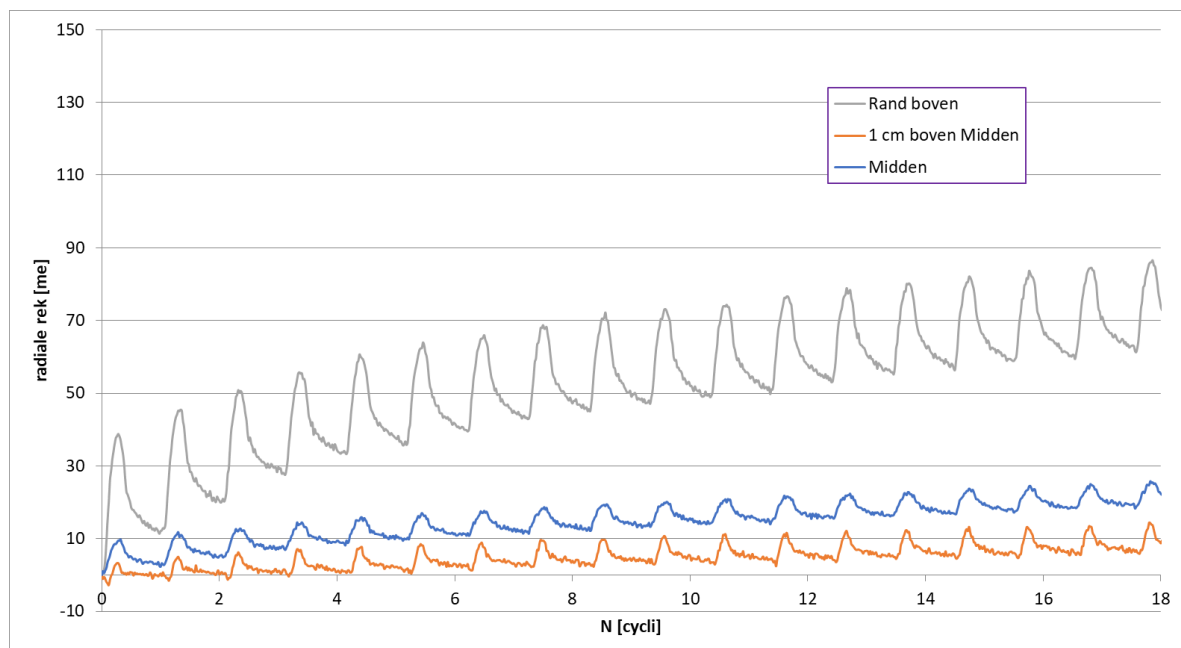
Figuur 4.37: Gemiddelde plastische radiale rek als functie van de hoogte van het proefstuk (H=80 mm met Latex)



Figuur 4.38: Verloop gemiddelde permanente axiale rek als functie van het aantal lastherhalingen (H80, met Latex)

4.2.13 H=80 mm met Teflon

Voor het proefstuk van 80mm met teflon als wrijvingsreductie zijn de resultaten hieronder weergegeven.

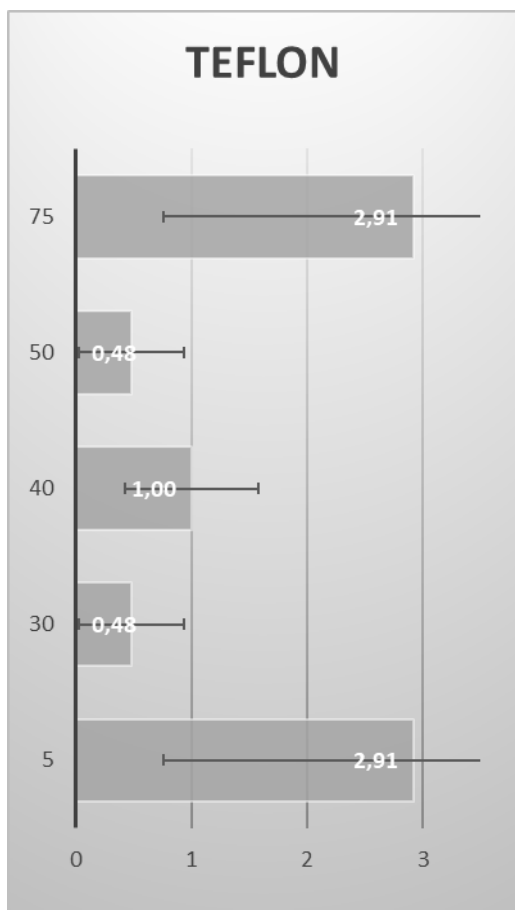


Figuur 4.39: Gemiddelde radiale rekstrooksignalen per hoogte bij H=80 mm met Teflon

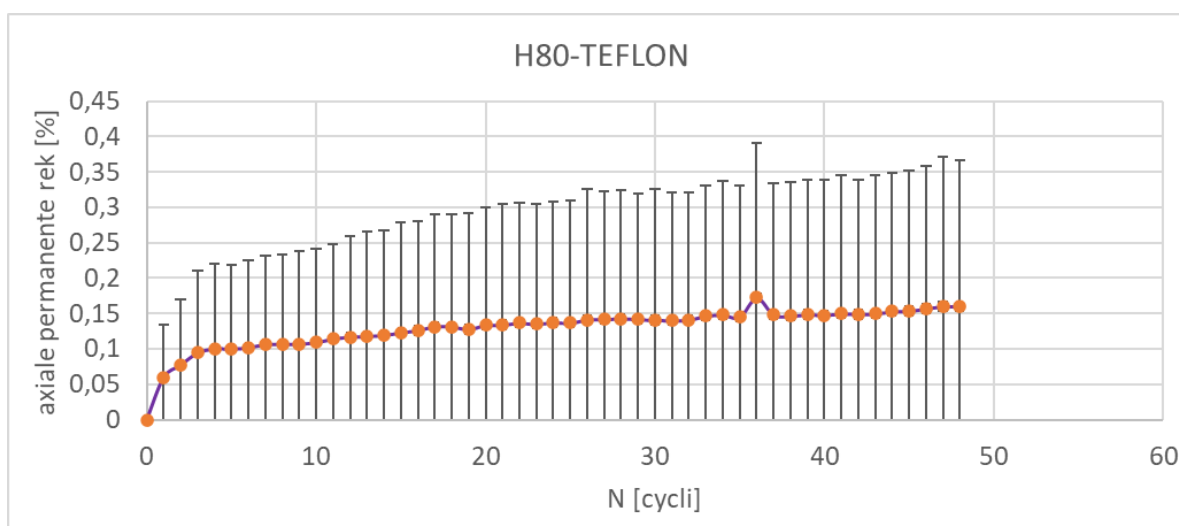
De elastische rek in het midden is kleiner dan de in paragraaf 3.4 bepaalde referentie waarde van $9 \mu\epsilon$ en vergelijkbaar in grootte met H80 op Latex. In dit geval is ook de rek op M+10 mm nog kleiner dan de referentie waarde (bij Latex was deze groter) en de waarde bij de rand is juist flink groter.

Tabel 4.14: Overzicht absolute en relatieve radiale rekken bij N=40 (H=80 mm, met Teflon)

H=80 TEFLON			
N=40	Midden (M)	M+10mm	rand-5mm
eps,e	6,72	8,10	22,12
	1,00	1,21	3,29
eps,p	29,53	14,16	86,07
	1,00	0,48	2,91
eps,e/eps,p	0,23	0,57	0,26

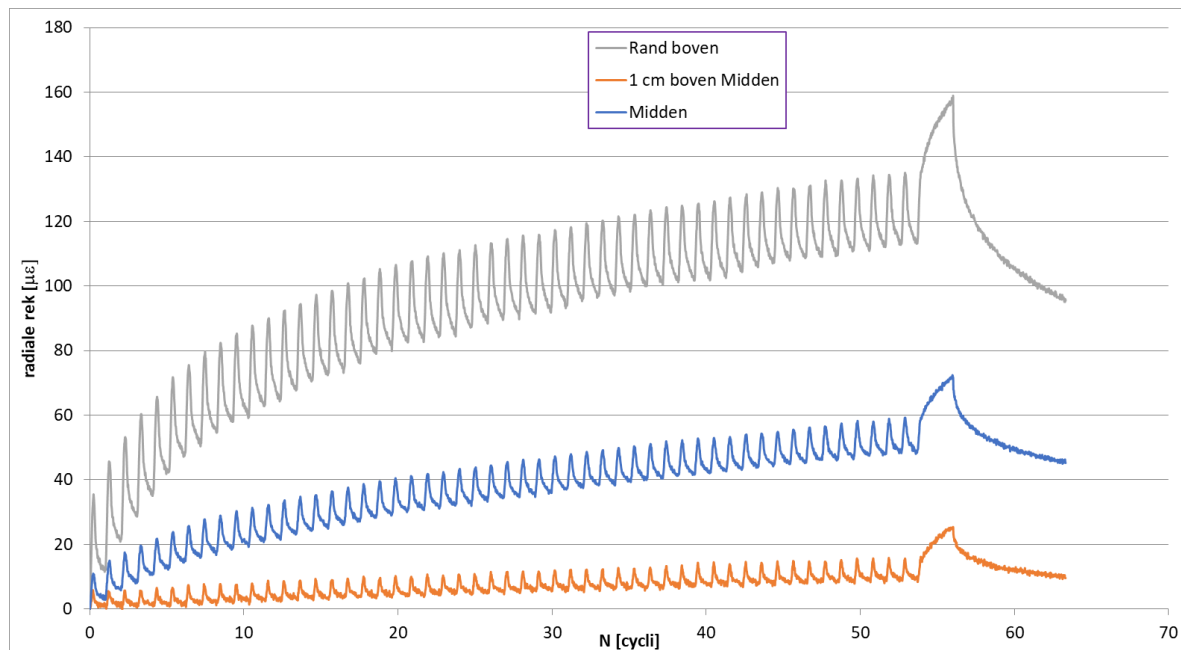


Figuur 4.40: Gemiddelde relatieve plastische radiale rek als functie van de hoogte van het proefstuk (H=80 mm met Teflon)



Figuur 4.41: Verloop gemiddelde permanente axiale rek als functie van het aantal lastherhalingen (H80-Teflon)

4.2.14 H=80 mm met Plastic folie

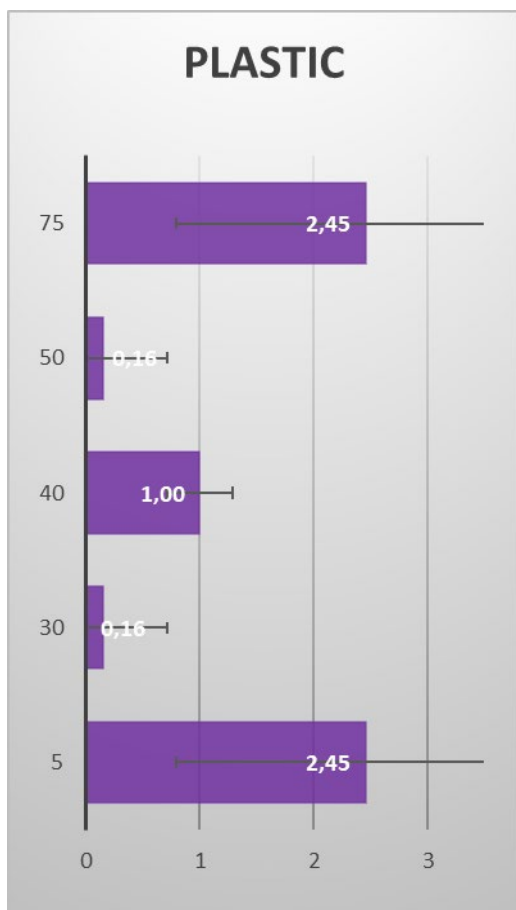


Figuur 4.42: Gemiddelde radiale rekstrooksignalen per hoogte op het proefstuk bij H=80 mm met Plastic folie

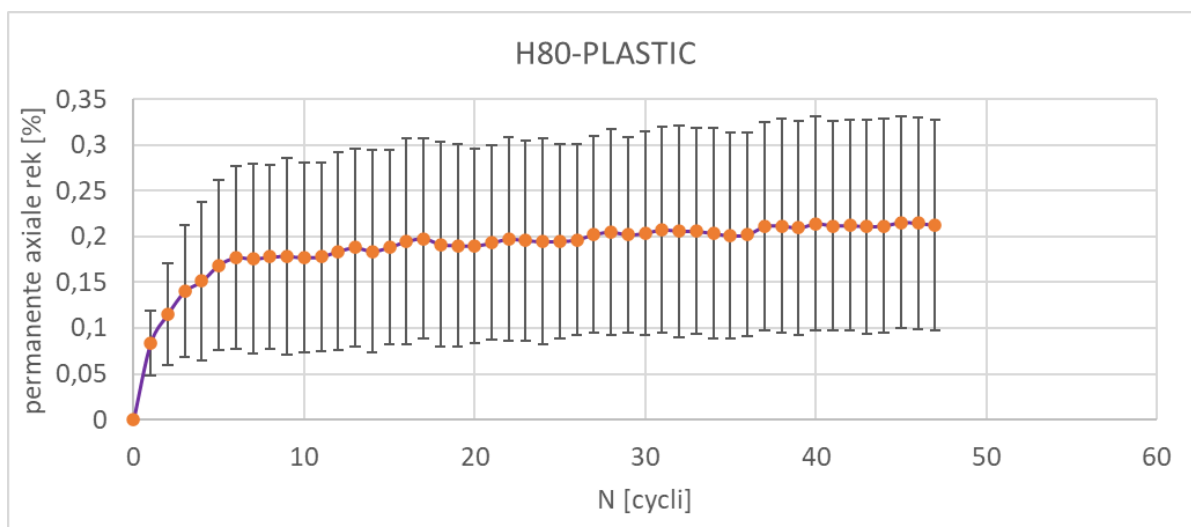
De elastische rek in het midden ligt dicht bij de in paragraaf 3.4 bepaalde referentie waarde van $9 \mu\epsilon$ dan bij H=60 mm het geval was. Ook M+10 mm ligt hier weer bij in de buurt, maar de rek aan de rand is nu veel groter dan de andere twee, waar deze bij H=60 mm nog kleiner was.

Tabel 4.15: Overzicht absolute en relatieve radiale rekken bij N=40 (H=80 mm, met Plastic folie)

H=80	PLASTIC		
N=40	Midden (M)	M+10mm	rand-5mm
eps,e	9,21	7,11	21,91
	1,00	0,77	2,38
eps,p	43,73	6,84	107,32
	1,00	0,16	2,45
eps,e/eps,p	0,21	1,04	0,20

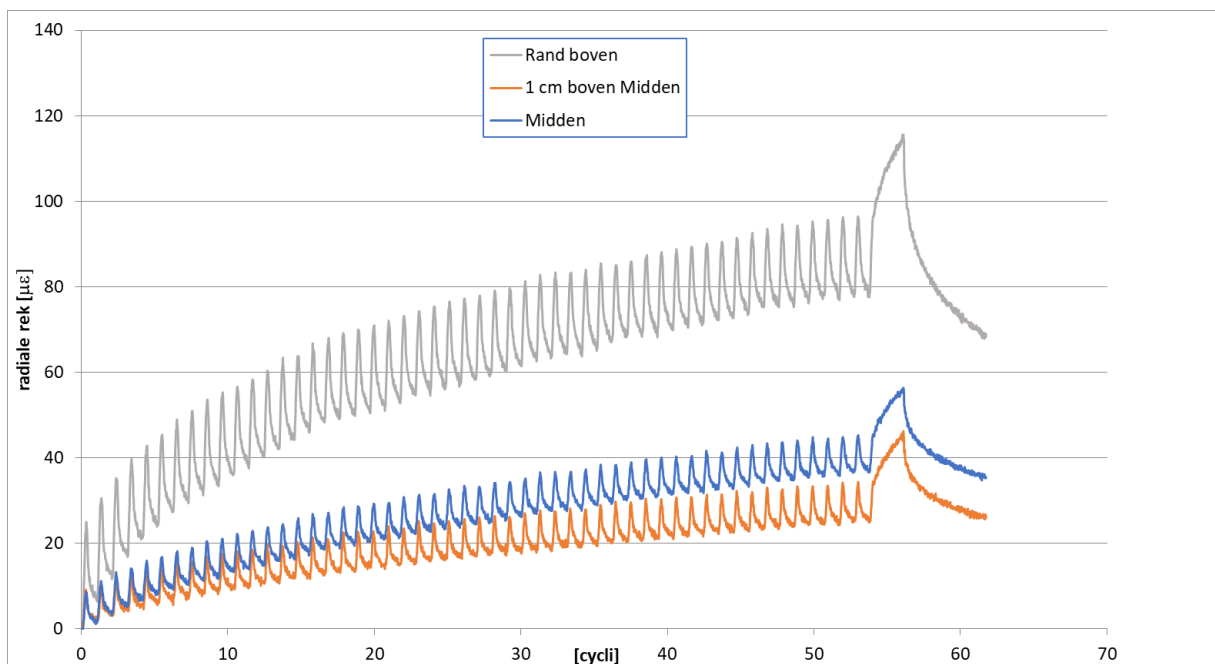


Figuur 4.43: Gemiddelde relatieve plastische radiale rek als functie van de hoogte van het proefstuk (H=80 mm met Plastic folie)



Figuur 4.44: Verloop gemiddelde permanente axiale rek als functie van het aantal lastherhalingen (H80- Plasticfolie)

4.2.15 H=80 mm met Plastic folie op Teflon

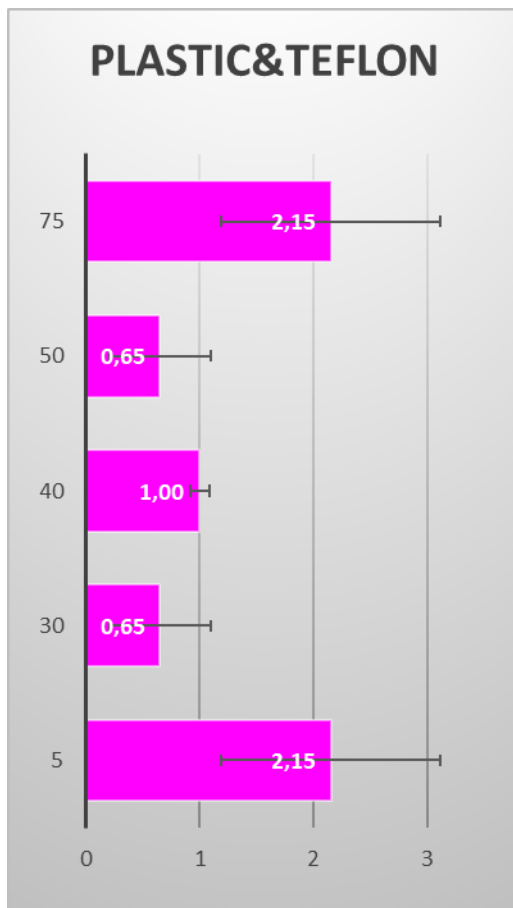


Figuur 4.45: Gemiddelde radiale rekstrooksignalen per hoogte bij H=80 mm en Plastic folie op Teflon

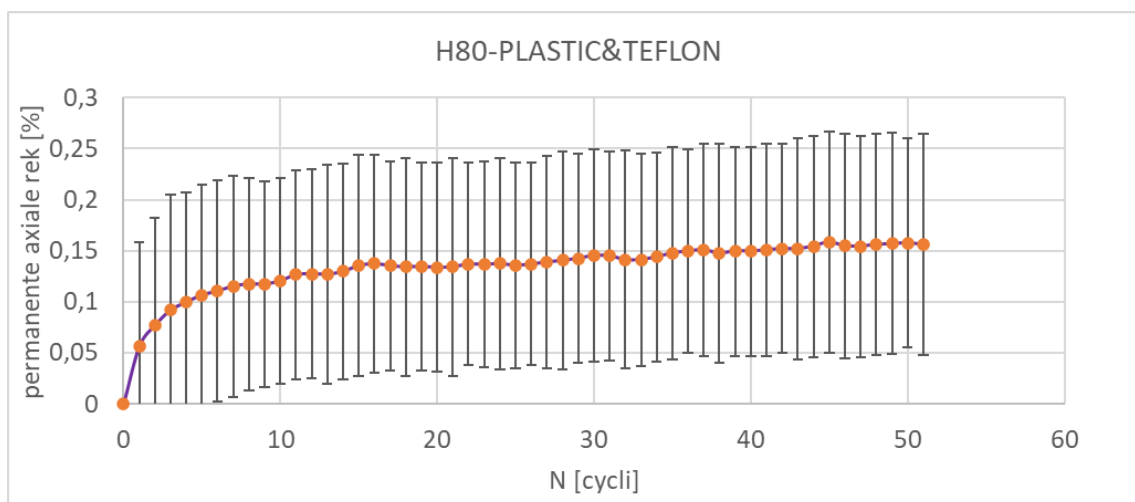
De elastische rek in het midden ligt weer redelijk in de buurt van de in paragraaf 3.4 bepaalde referentie waarde van $9 \mu\epsilon$, al is het verschil wat groter dan bij H=60 mm. En net als bij Plastic op RVS is in dit geval de rek bij de rand groter dan de andere twee in plaats van kleiner zoals bij H=60 mm.

Tabel 4.16: Overzicht absolute en relatieve radiale rekken bij N=40 (H=80 mm, met Plastic folie op Teflon)

H=80	PLASTIC&TEFLON		
N=40	Midden (M)	M+10mm	rand-5mm
eps,e	8,32	9,15	17,57
	1,00	1,10	2,11
eps,p	32,62	21,25	70,19
	1,00	0,65	2,15
eps,e/eps,p	0,25	0,43	0,25

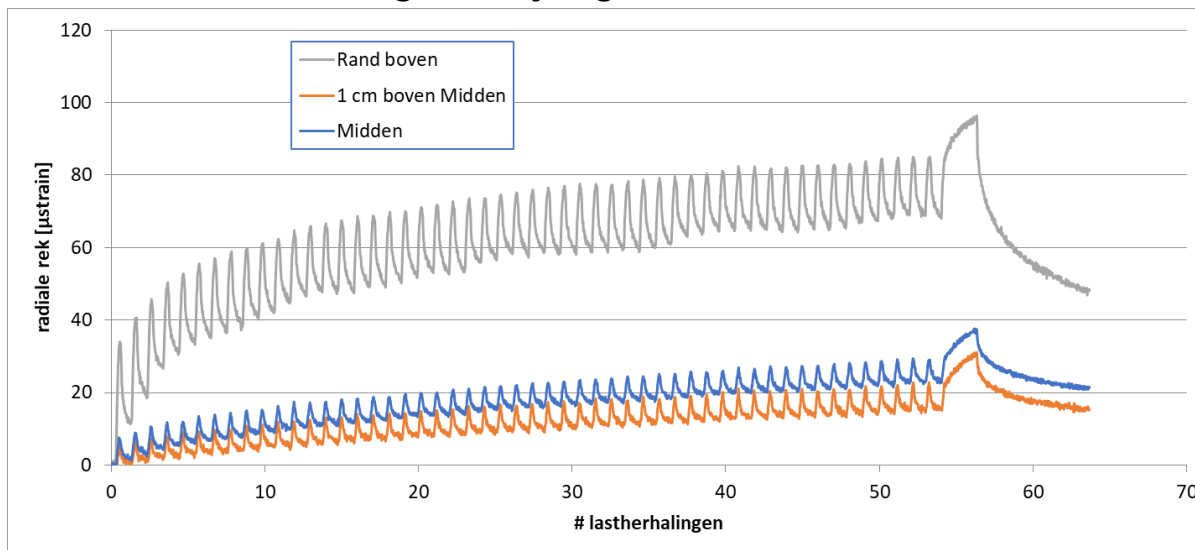


Figuur 4.46: Gemiddelde plastische radiale rek als functie van de hoogte van het proefstuk (H=80 mm met Plastic folie op Teflon)



Figuur 4.47: Verloop gemiddelde permanente axiale rek als functie van het aantal lastherhalingen (H80 - Plastic folie op Teflon)

4.2.16 H=100 mm, geen wrijvingsreductie

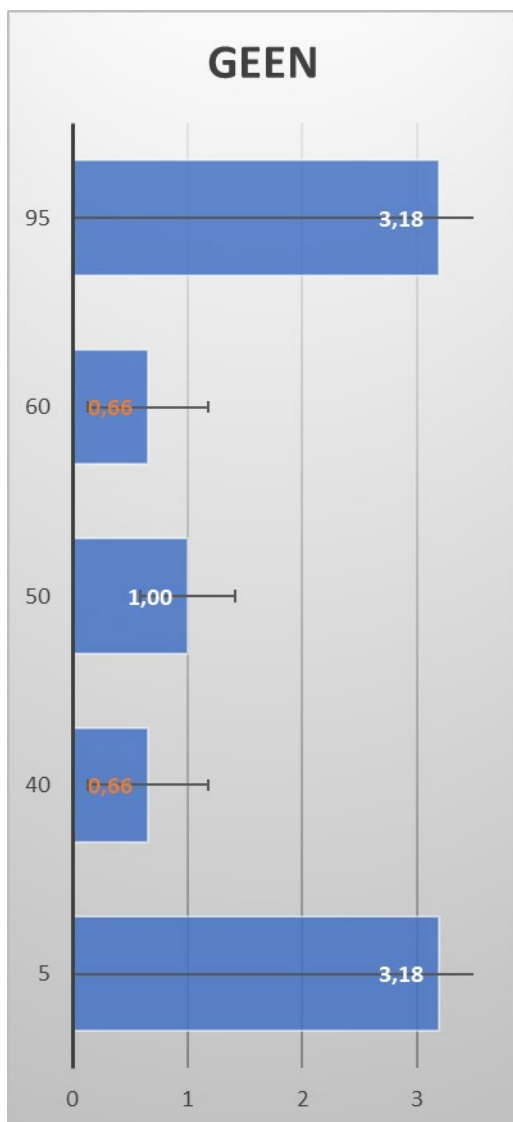


Figuur 4.48: Gemiddelde radiale rekstrooksignalen per hoogte bij H=100 mm zonder wrijvingsreductie

De elastische rek in het midden ligt op zo'n tweederde van de in paragraaf 3.4 bepaalde referentie waarde van $9 \mu\epsilon$, M+10 mm ligt er dichterbij en de waarde aan de rand is weer groter.

Tabel 4.17: Gemiddelde radiale elastische en plastische rekken [$\mu\epsilon$] per hoogte, absoluut en relatief t.o.v. de (absolute waarde van) de rek in het midden van het proefstuk

H=100	GEEN		
N=40	Midden (M)	M+10mm	rand-5mm
eps,e	6,32	8,10	16,76
	1,00	1,28	2,65
eps,p	20,03	13,16	63,76
	1,00	0,66	3,18
eps,e/eps,p	0,32	0,62	0,26

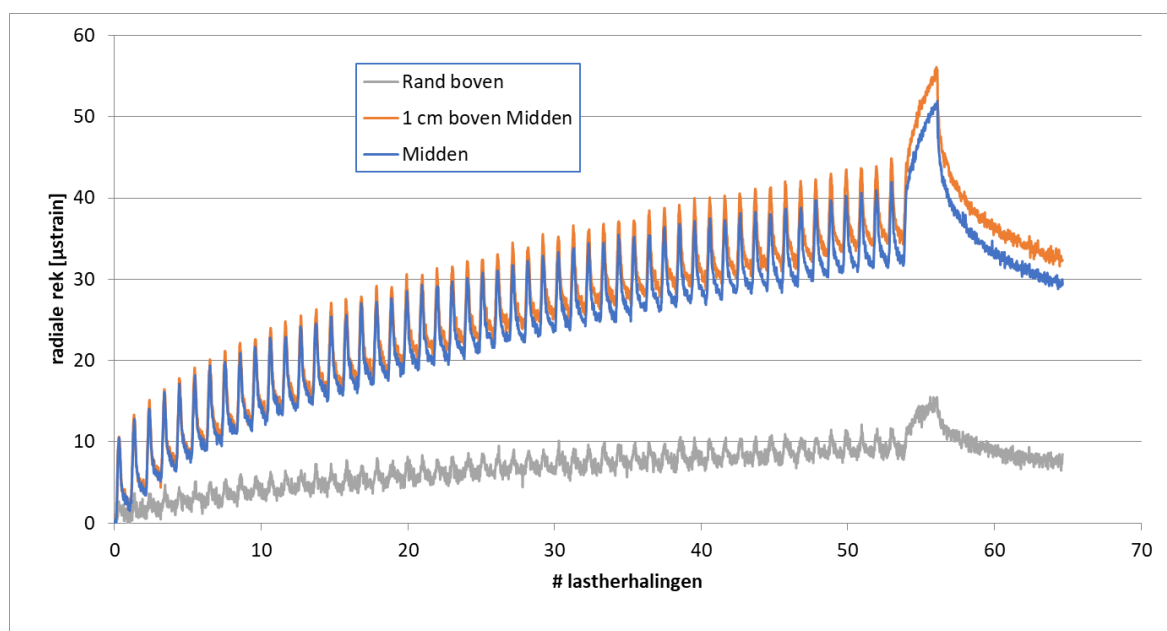


Figuur 4.49: Gemiddelde relatieve radiale plastische rekken als functie van de hoogte van het proefstuk

Er zijn geen metingen met LVDTs gedaan bij het proefstuk van 100 mm hoog.

4.2.17 H=100 mm met Latex

Voor het proefstuk met hoogte van 100 mm met twee lagen latex en vet ertussen, zijn de resultaten als volgt:

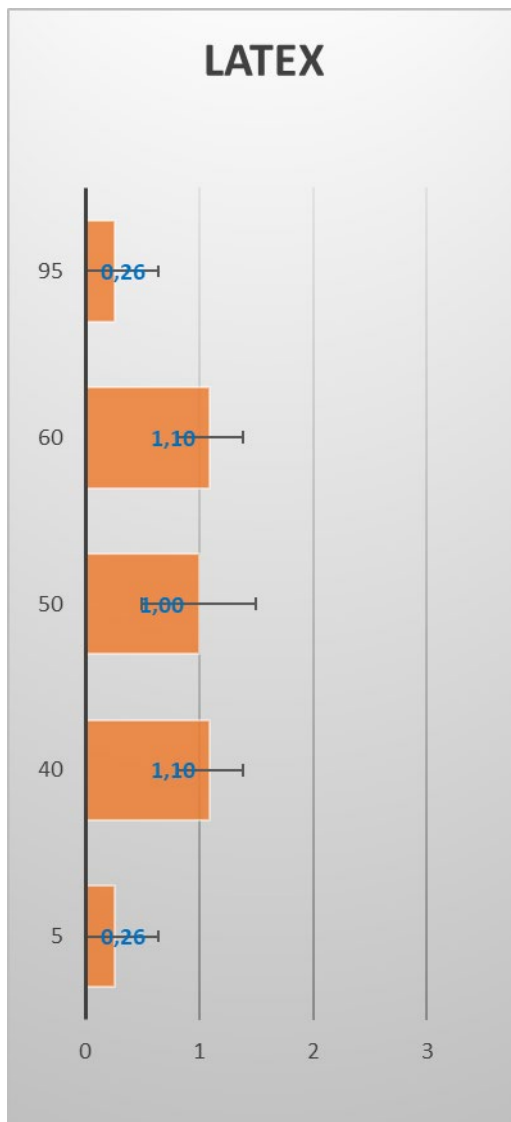


Figuur 4.50: Gemiddelde radiale rekstrooksignalen per hoogte bij H=100 mm met Latex

De elastische rek in het midden en die op M+10 mm ligt rond de in paragraaf 3.4 bepaalde referentie waarde van $9 \mu\epsilon$, terwijl de waarde aan de rand weer een stuk kleiner blijft.

Tabel 4.18: Overzicht absolute en relatieve radiale rekken bij N=40 (H=100 mm, met Latex)

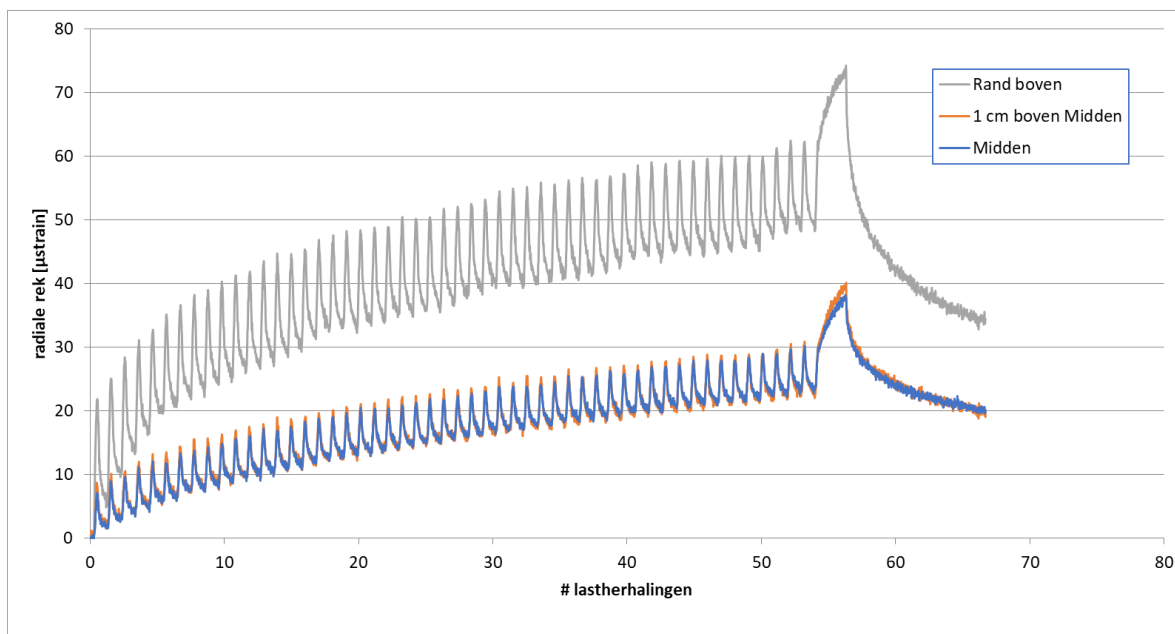
H=100	LATEX		
N=40	Midden (M)	M+10mm	rand-5mm
eps,e	9,36	9,97	3,22
	1,00	1,07	0,34
eps,p	26,52	29,09	6,93
	1,00	1,10	0,26
eps,e/eps,p	0,35	0,34	0,46



Figuur 4.51: Gemiddelde relatieve plastische radiale rek als functie van de hoogte (H=100 mm, met Latex)

4.2.18 H=100 mm met Teflon

Voor het proefstuk met een hoogte van 100 mm met teflon als wrijvingsreductie, zijn de resultaten als volgt:

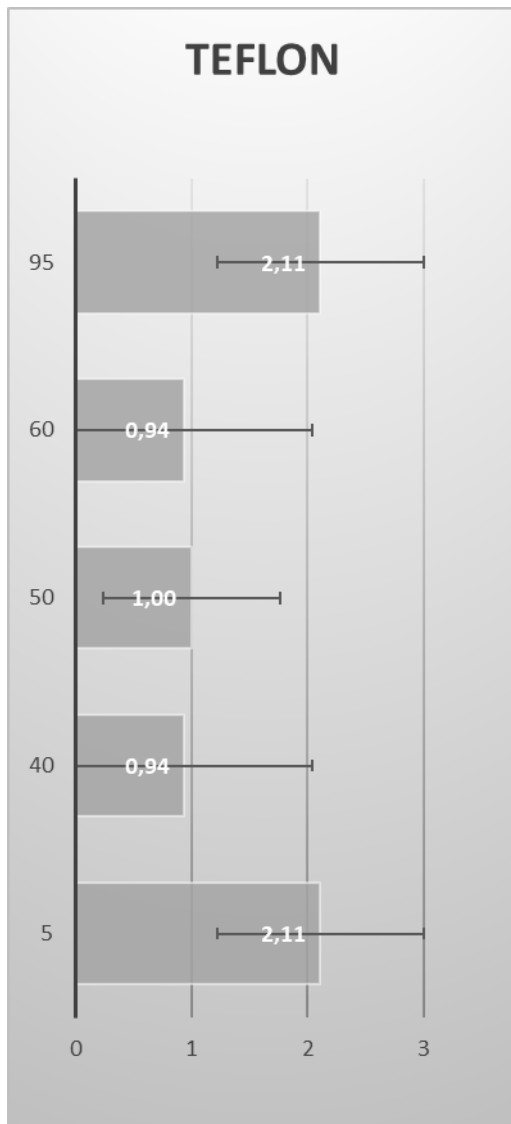


Figuur 4.52: Gemiddelde radiale rekstrooksignalen per hoogte bij H=100 mm met Teflon

Het patroon van de elastische rek amplitudes is weer vergelijkbaar met dat voor Geen, met de rek in het midden op zo'n tweederde van de in paragraaf 3.4 bepaalde referentie waarde van $9 \mu\epsilon$, M+10 mm daar iets dichterbij en de waarde aan de rand die juist groter is dan de referentie.

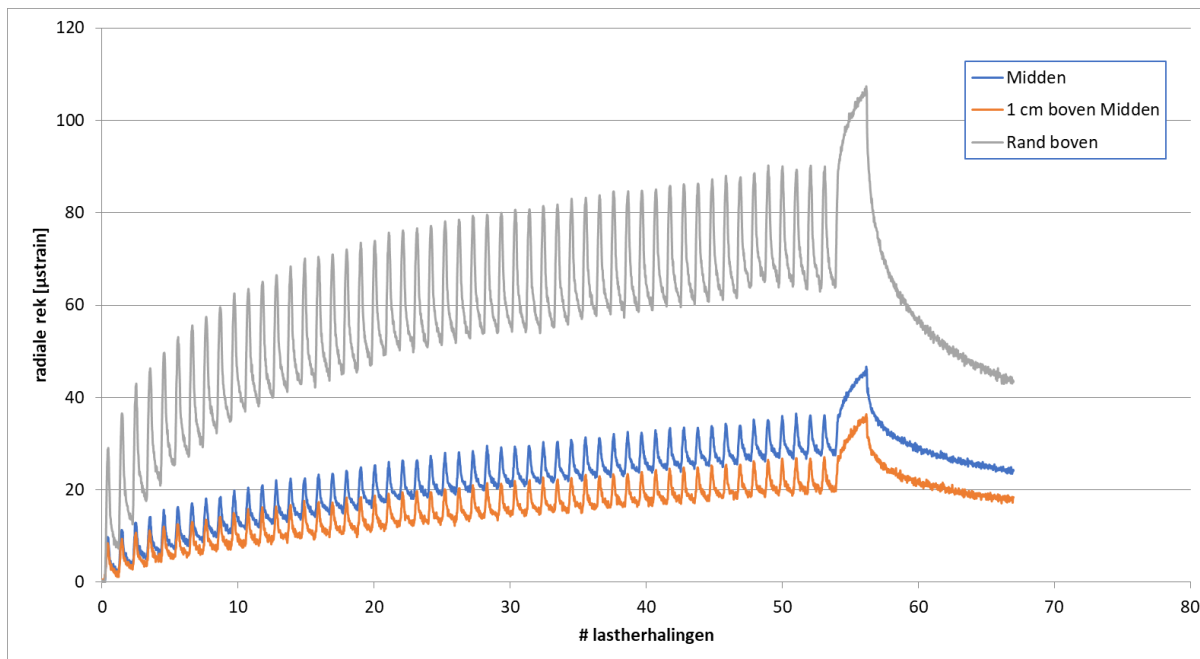
Tabel 4.19: Overzicht absolute en relatieve radiale rekken bij N=40 (H=100 mm met Teflon)

H=100		TEFLON		
N=40		Midden (M)	M+10mm	rand-5mm
eps,e		6,21	7,39	13,60
		1,00	1,19	2,19
eps,p		20,77	19,45	43,80
		1,00	0,94	2,11
eps,e/eps,p		0,30	0,38	0,31



Figuur 4.53: Gemiddelde plastische radiale rek als functie van de hoogte van het proefstuk (H=100 mm met Teflon)

4.2.19 H=100 mm met Plasticfolie

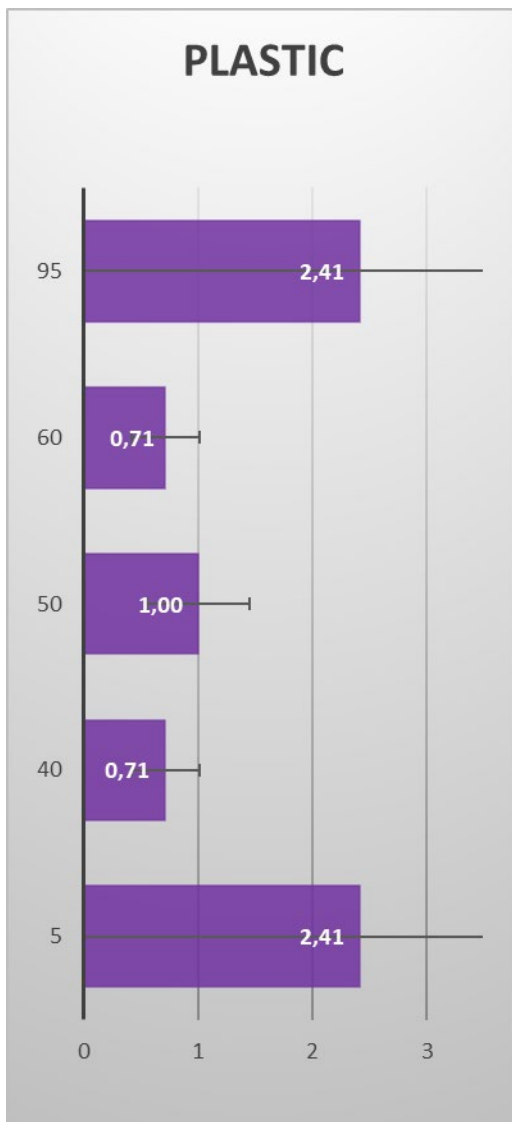


Figuur 4.54: Gemiddelde radiale rekstrooksignalen per hoogte bij H=100 mm met Plastic folie

De elastische rek in het midden ligt redelijk in de buurt van die op M+10 mm, de rek in het midden van het proefstuk lijkt dus redelijk uniform, maar naar de rand wijkt het flink af en (daardoor?) wijken de waarden in alle gevallen af van de in paragraaf 3.4 bepaalde referentie waarde van $9 \mu\epsilon$.

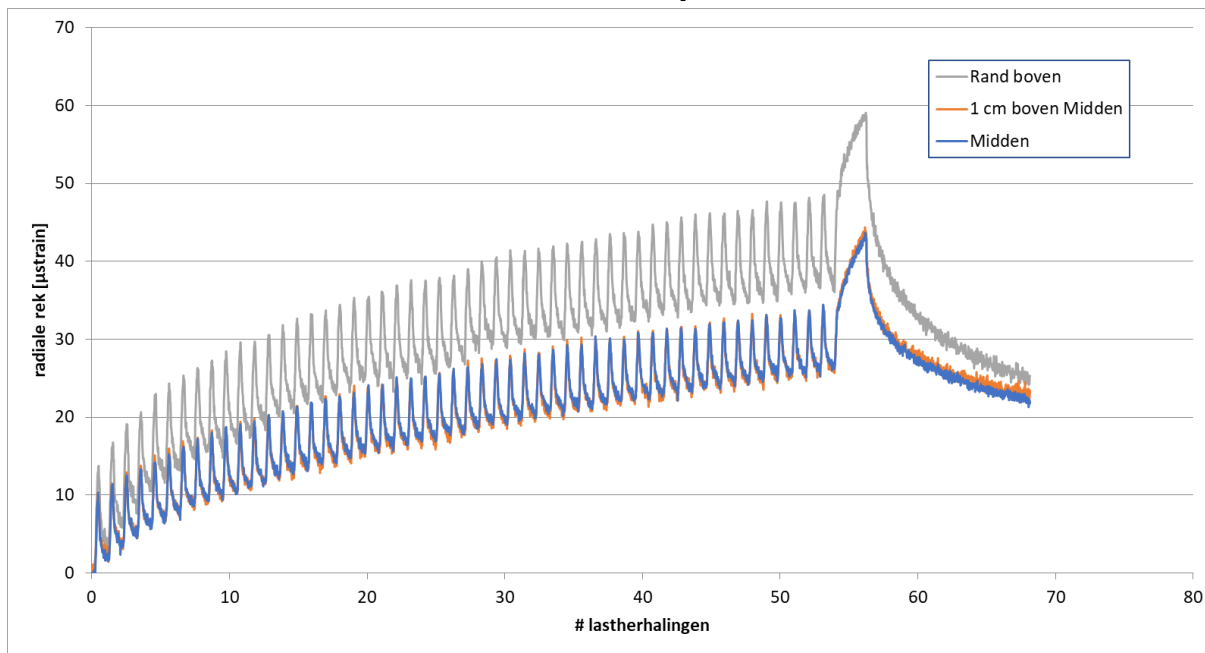
Tabel 4.20: Overzicht absolute en relatieve radiale rekken bij N=40 (H=100 mm met Plastic folie)

H=100	PLASTIC		
N=40	Midden (M)	M+10mm	rand-5mm
eps,e	7,31	6,57	24,31
	1,00	0,90	3,33
eps,p	24,76	17,63	59,66
	1,00	0,71	2,41
eps,e/eps,p	0,30	0,37	0,41



Figuur 4.55: Gemiddelde plastische radiale rek als functie van de hoogte van het proefstuk (H=100 mm met Plastic folie)

4.2.20 H=100 mm met Plastic folie op Teflon

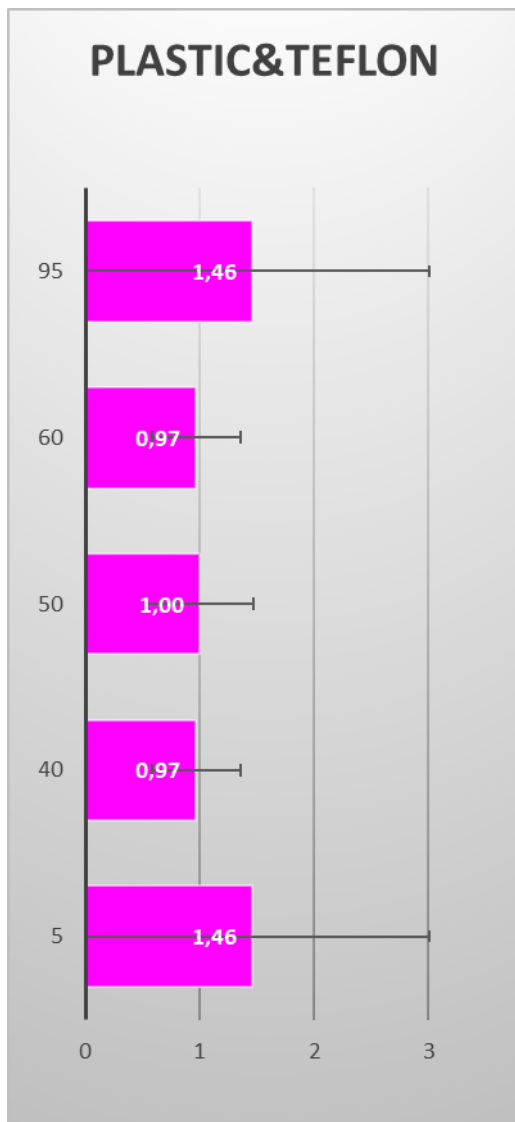


Figuur 4.56: Gemiddelde radiale rekstrooksignalen per hoogte bij H=100 mm met Plastic folie op Teflon

Tabel 4.21: Overzicht absolute en relatieve radiale rekken bij N=40 (H=100 mm met Plastic folie op Teflon)

H=100	PLASTIC&TEFLON		
N=40	Midden (M)	M+10mm	rand-5mm
eps,e	7,59	8,67	11,06
	1,00	1,14	1,46
eps,p	22,76	22,00	33,21
	1,00	0,97	1,46
eps,e/eps,p	0,33	0,39	0,33

De elastische rekken op alle drie de hoogtes zijn redelijk vergelijkbaar, als blijft de rek bij de plaat ongeveer een kwart groter (ook de plastische). Het beeld is wel het meest homogeen voor dit systeem en de elastische waarden liggen allemaal in de buurt van de in paragraaf 3.4 bepaalde referentie waarde van $9 \mu\epsilon$.

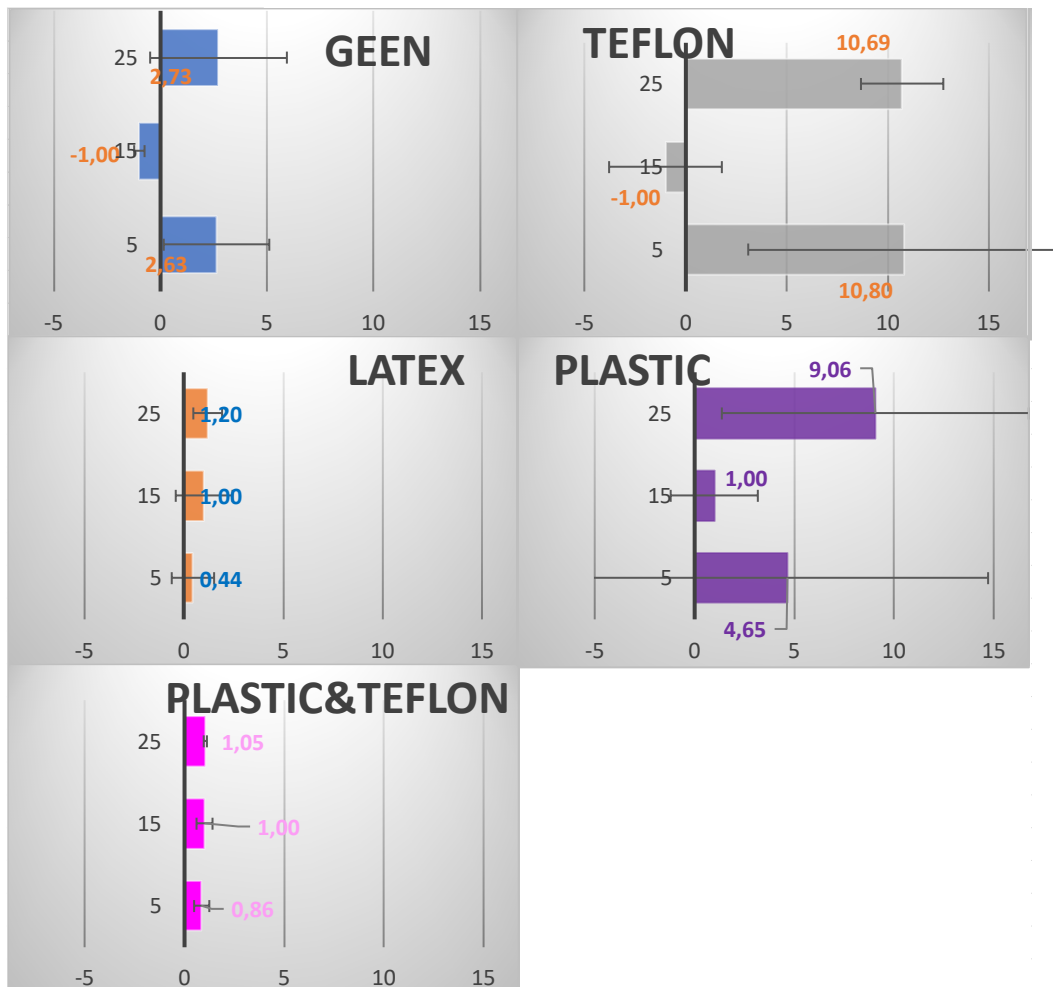


Figuur 4.57: Gemiddelde plastische radiale rek als functie van de hoogte van het proefstuk (H=100 mm met Plastic folie op Teflon)

4.3 Resultaten per hoogte proefstuk

4.3.1 H=30 mm

In Figuur 4.59 zijn de relatieve radiale rekken over de hoogte voor de verschillende wrijvingsreductiesystemen bij H=30 mm weergegeven.



Figuur 4.58: Relatieve radiale plastische rek over de hoogte voor $H=30$ mm en de verschillende systemen

Het meest uniform is de vervorming over de hoogte bij Plastic&Teflon en ook Latex is relatief uniform, maar ook asymmetrisch. Verder valt op dat bij “Geen reductie” en Teflon de rek in het midden negatief is, de diameter is in het midden dus afgenomen, wat niet logisch is in een drukproef en zeker niet bij veel wrijving, dan wordt meestal tonvorming gezien. In dit geval geven Teflon en “Geen reductie” juist een zandloper vorm, met een flinke (relatieve) toename in diameter aan de contactvlakken en een afname in het midden. Ook Plastic laat een zandloper vorm zien, maar wel met enige toename aan diameter in het midden van het proefstuk.

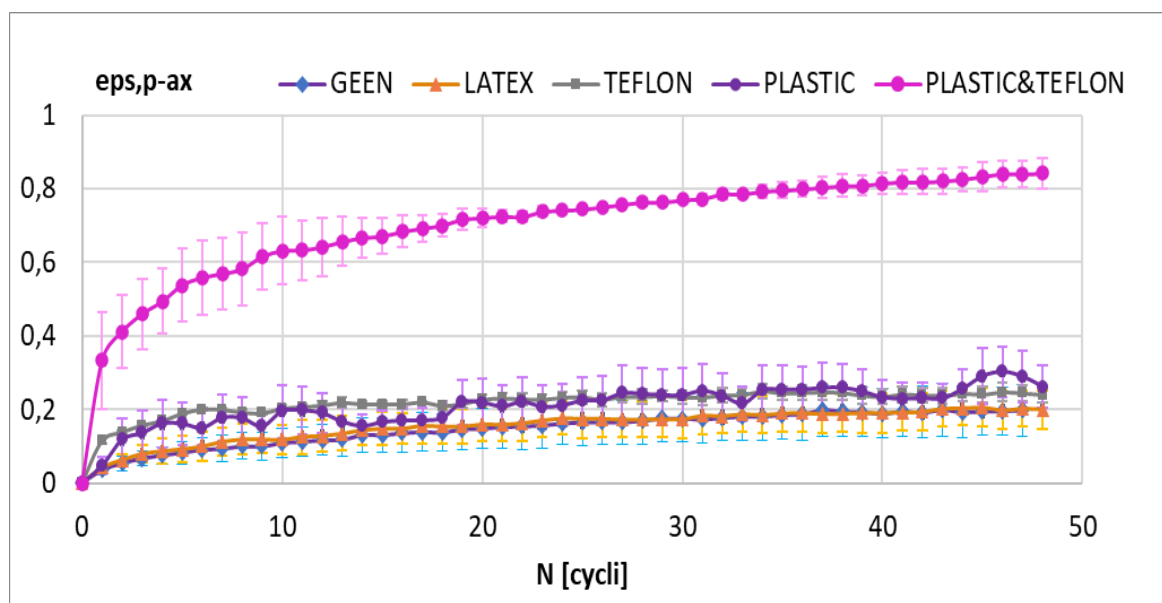
Omdat in de figuur de relatieve radiale plastische rekken zijn gegeven, zijn in onderstaande tabel de absolute waarden van de elastische en plastische rek in het midden van het proefstuk opgenomen en hun rangorde van klein naar groot. Hier zien we dat de rek in het midden het kleinst is voor “Geen reductie”, gevolgd door Teflon. Ook dit is tegen de verwachtingen in.

Kijkend naar de waarden van de elastische rekken in het midden (voor $N=40$) dan is te zien dat alleen Latex en Plastic op Teflon in de buurt liggen van de in paragraaf 3.4 bepaalde referentie waarde van $9 \mu\epsilon$.

Tabel 4.22: Gemeten gemiddelde waarden in het midden van het proefstuk H=30 mm voor elastische en plastische rek in $\mu\epsilon$

H=30 N=40	elastisch H=30mm	nr	plastisch Midden	nr
GEEN	-12,88	1	-55,74	1
LATEX	10,46	5	58,62	5
TEFLON	-4,27	2	-9,05	2
PLASTIC	0,13	3	13,68	3
PLASTIC&TEFLON	9,13	4	52,34	4

In figuur 4.58 zijn de axiale rekken (in %) gegeven voor de verschillende systemen en hier valt op dat “Geen reductie” en Latex vrijwel op elkaar liggen, net als Plastic en Teflon, terwijl Plastic op Teflon flink meer vervorming vertoont. Dat Plastic op Teflon tot de meeste vervorming leidt, is conform verwachting, maar het is verrassend dat Plastic op RVS zoveel afwijkt en dicht bij Teflon ligt. Ook is het tegen de verwachtingen in dat Latex zo dicht bij “Geen reductie” ligt.

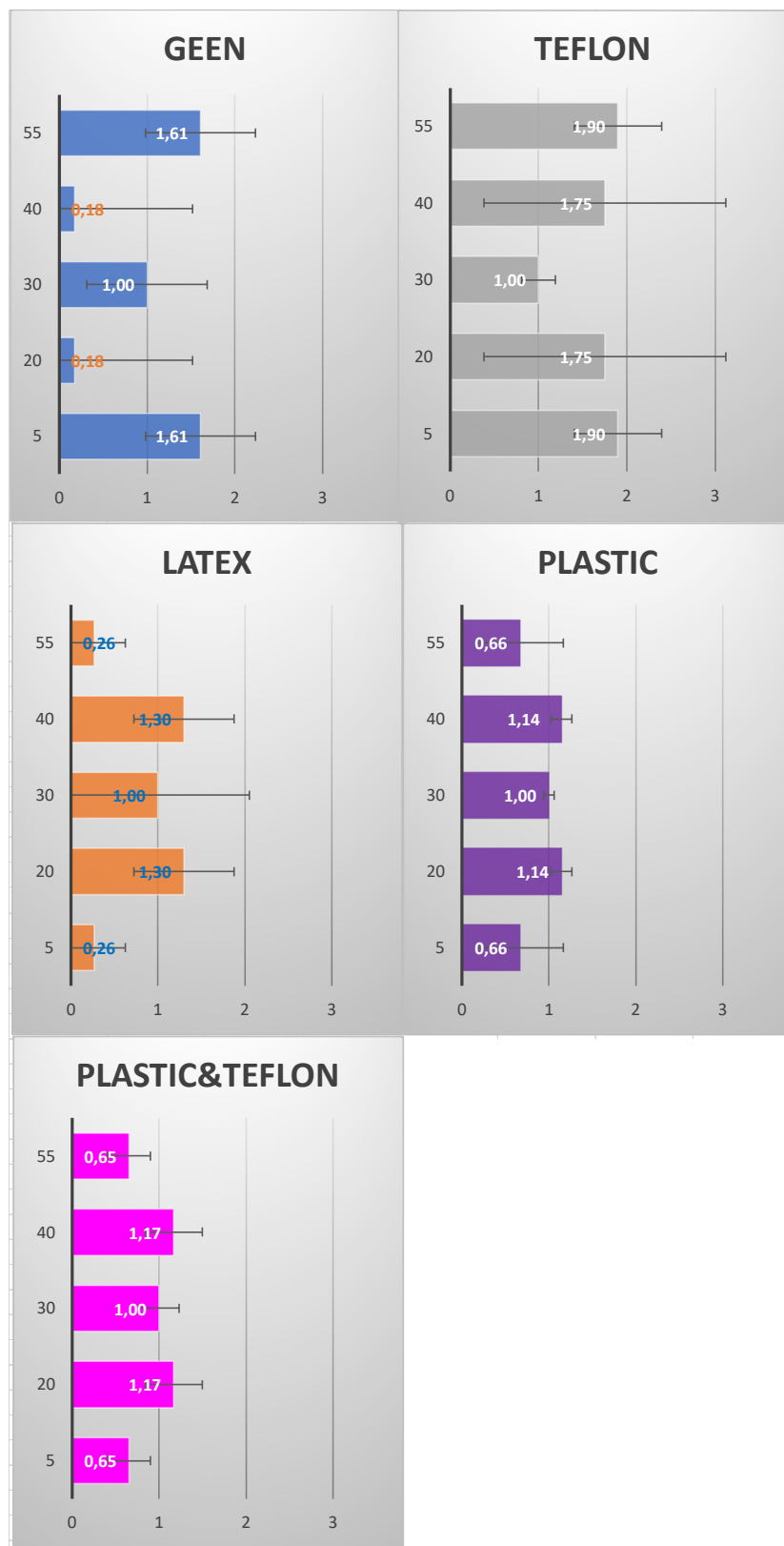


Figuur 4.59: Axiale rekken in [%] voor verschillende wrijvingsreductie systemen voor H=30 mm

4.3.2 H=60 mm

De radiale plastische rek over de hoogte laat, behalve voor teflon, een vreemd fenomeen zien, waarbij de rek 10 mm vanaf het midden van het proefstuk groter of kleiner is dan de rek bij de andere twee posities. Dat is onverwacht en niet te verklaren vanuit de opgelegde belasting. Mogelijk is het een randeffect, of heeft het te maken met het feit dat deze tussenliggende rekstroken versprongen (op een andere verticaal) zitten dan de rekstroken bij de rand en in het midden, maar ook de relatief grote variatie in de individuele metingen (zie foutenbalken) spelen mee. Hierop wordt in paragraaf 4.6 verder in gegaan.

In dit geval zien we geen negatieve horizontale rekken meer, dus het proefstuk zet uit over de gehele hoogte. De rek aan de randen is, ten opzicht van het midden, groter bij “Geen reductie” en Teflon en kleiner bij alle andere systemen. Voor de signalen 10 mm boven het midden is het beeld omgekeerd.



Figuur 4.60: Relatieve radiale plastische rek over de hoogte voor H=60 mm en verschillende systemen

In de onderstaande tabel zijn de rekken in het midden (elastisch en plastisch) in radiale richting per systeem gegeven en gerangschikt van klein naar groot. De grootste vervorming in het midden treedt op bij “Geen reductie”, hetgeen je zou verwachten bij uitbuiken/tonvorming. De relatieve radiale plastische rek in bovenstaande figuur geeft dit beeld echter niet. Integendeel, voor “Geen reductie” is de radiale plastische rek

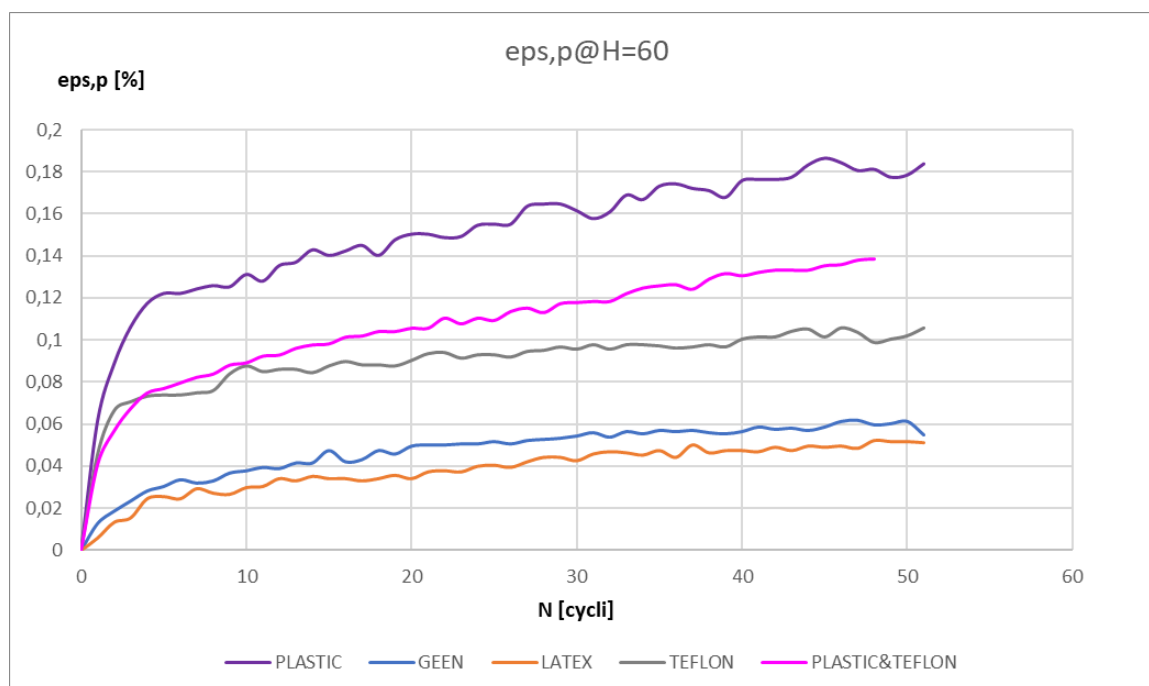
in het midden kleiner dan boven het midden en net onder de plaat. De kleinste radiale plastische rek in het midden treedt op Teflon, terwijl de verwachting is dat dit dicht bij “Geen reductie” zou liggen. De andere drie systemen liggen dicht bij elkaar.

Voor de elastische rek in het midden is Teflon ook de kleinste, maar nu liggen “Geen reductie” en Plastic dicht bij elkaar en Latex en Plastic & Teflon ook. Uitgaande van de referentie waarde van $9 \mu\epsilon$ voor de amplitude van de elastische rek (paragraaf 3.4) is te zien dat Latex, gevolgd door Plastic&Teflon en Plastic. Ook “Geen reductie” zit in de richting, terwijl Teflon een stuk lager uitkomt.

Tabel 4.23: Gemeten elastische en plastische radiale rekken in het midden van het proefstuk (40^e puls)

H=60 N=40	elastisch Midden	[$\mu\epsilon$]	plastisch Midden	[$\mu\epsilon$]
GEEN	8,01	2	37,70	5
LATEX	9,14	4	28,06	2
TEFLON	5,37	1	21,01	1
PLASTIC	8,15	3	29,13	4
PLASTIC&TEFLON	9,3	5	28,15	3

De axiale plastische rekken zijn het grootst voor Plastic en Plastic op Teflon, gevolgd door respectievelijk Teflon, “Geen reductie” en Latex. De verwachting was dat Latex bij of zelfs boven de beide plastic systemen zou liggen en dat Teflon het dichtst bij “Geen reductie” in de buurt zit.

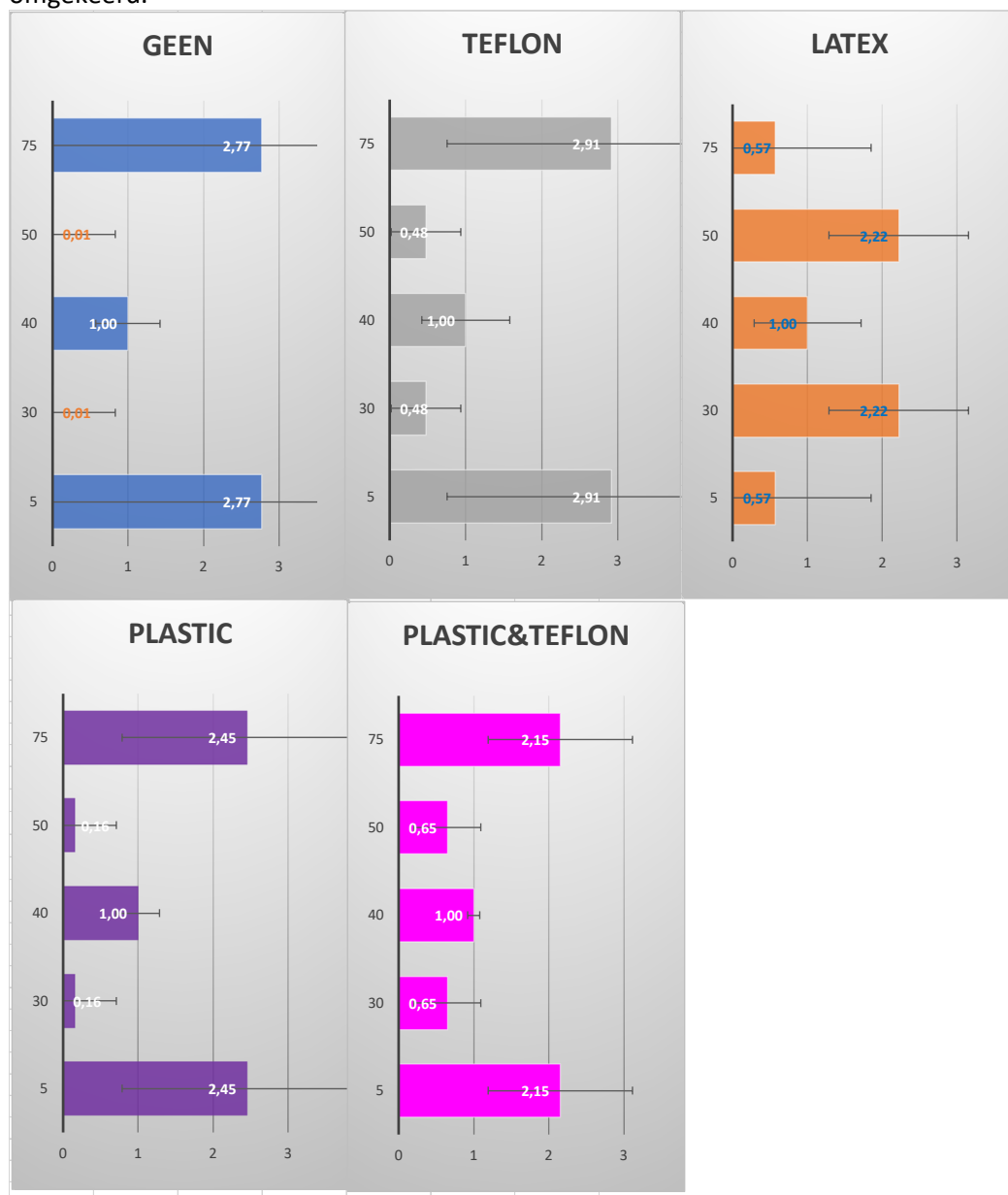


Figuur 4.61: Permanente axiale rek [%] voor H=60 mm en de verschillende systemen

4.3.3 H=80 mm

Deze resultaten zijn voor de relatieve radiale permanente rek als functie van de hoogte vergelijkbaar met die van H=60 mm. Ook bij deze hoogte is het beeld dat de rekstroken op 10 mm boven het midden de grootste of juist kleinste vervorming geven, terwijl de verwachting is dat deze tussen beide anderen in zou liggen. Ook zijn hier, net als bij H=60 mm alle radiale signalen (net) positief, dus het proefstuk zet uit. De signalen aan de rand zijn het grootst t.o.v. het midden voor Teflon en “geen reductie”, iets minder groot voor Plastic en Plastic op

Teflon en kleiner voor Latex . Voor de signalen op 10 mm boven het midden ten opzichte van het midden is dit omgekeerd.



Figuur 4.62: Radiale permanente rek over de hoogte voor H=80 mm

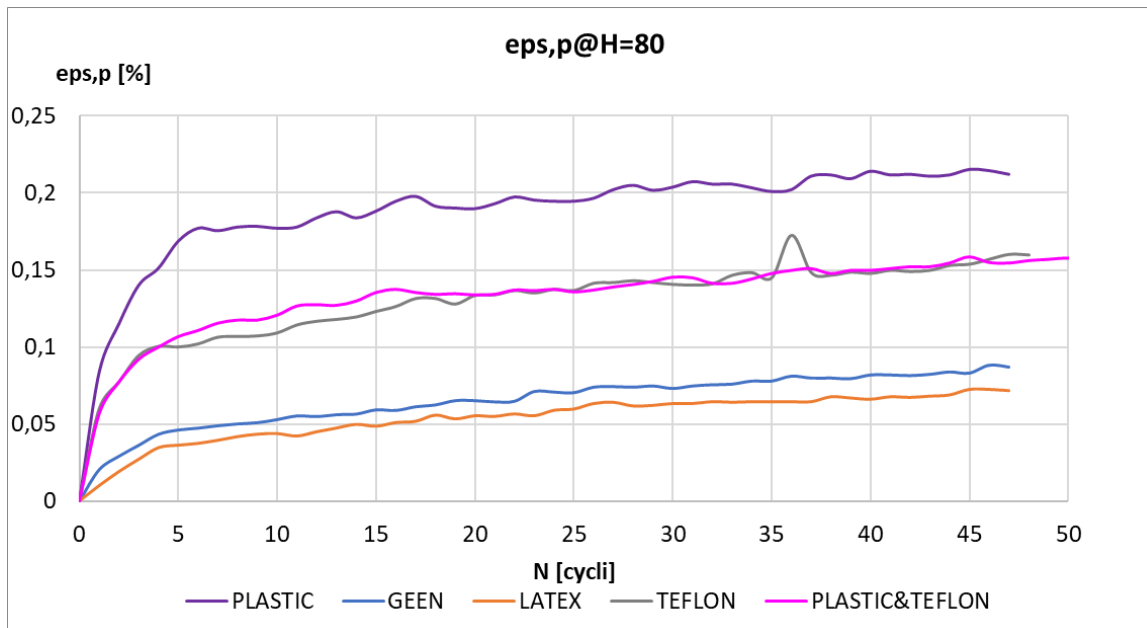
De absolute radiale rekken in het midden zijn voor deze proefstukhoogte het kleinste voor Latex en Teflon, wat conform de verwachting is voor Latex, maar niet voor Teflon. Daarna komt voor de elastische rek “Geen reductie” en voor de plastische Plastic&Teflon. Plastic geeft de grootste radiale rek, zowel elastisch als plastisch.

De orde grootte van de elastische rekken ligt voor alle systemen in de orde grootte van de referentie waarde (9 με, paragraaf 3.4).

Tabel 4.24: Gemiddelde gemeten radiale elastische en plastische rek in het midden bij H=80 mm

H=80 N=40	elastisch Midden	[$\mu\epsilon$]	plastisch Midden	[$\mu\epsilon$]
GEEN	7,56	3	36,62	4
LATEX	6,29	1	21,95	1
TEFLON	6,72	2	29,53	2
PLASTIC	9,21	5	43,73	5
PLASTIC&TEFLON	8,32	4	32,62	3

Voor de permanente axiale rek liggen “Geen reductie” en Latex weer dicht bij elkaar en Teflon ligt nu nog dichter bij Plastic en Plastic op Teflon dan voor H=60 mm.

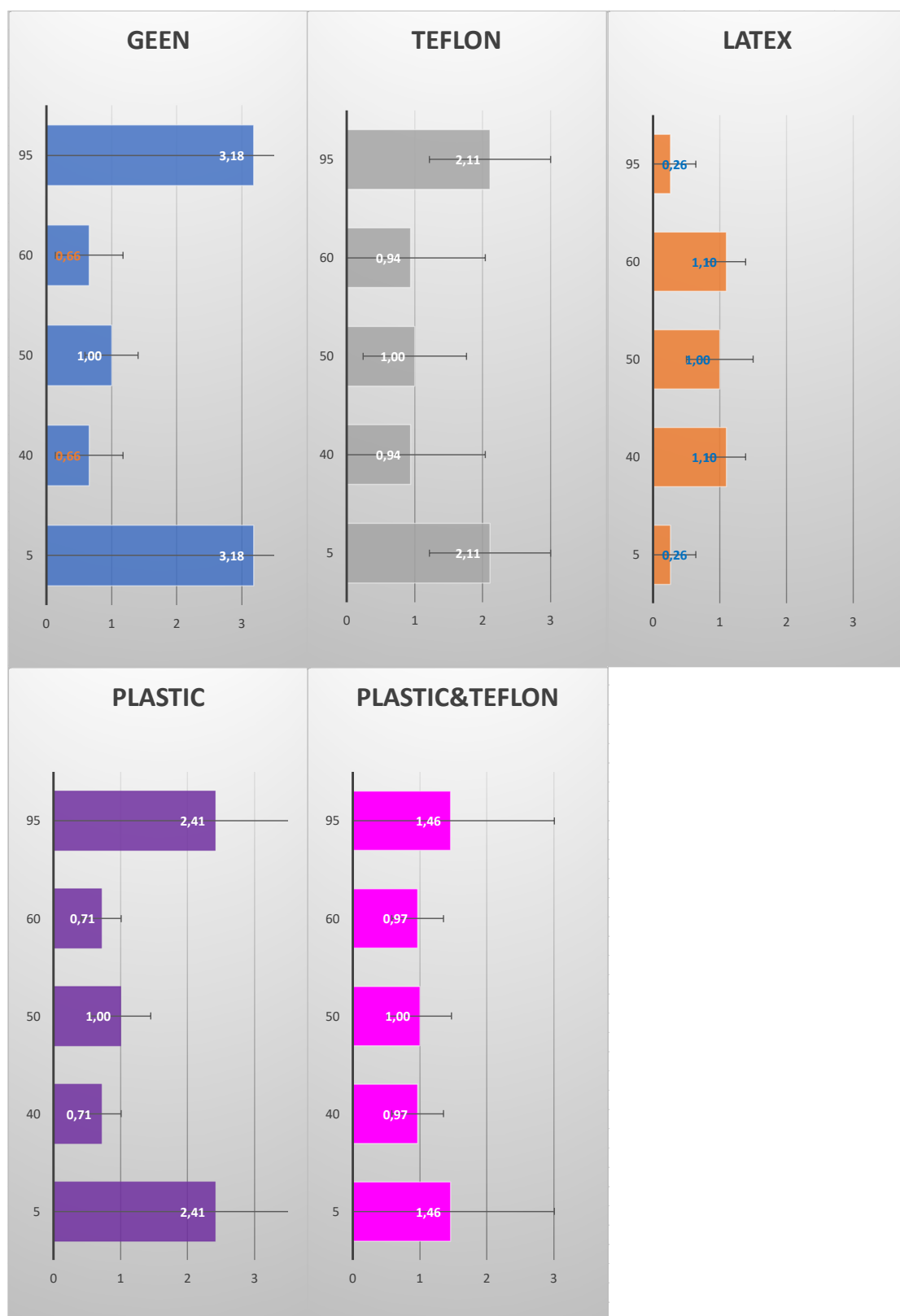


4.3.4 H=100 mm

Bij de 100 mm metingen ontbreken de permanente axiale signalen, dus hier wordt alleen naar de radiale rek gekeken.

De relatieve radiale plastische rek over de hoogte laat nog steeds een piek (of dip) zien bij de rekstrook op 10 mm van het midden, maar het effect is wel kleiner. De rek op 10 mm van het midden komt zoals verwacht dichterbij die in het midden uit.

Tegelijkertijd blijft hier het beeld dat “Geen reductie” en Teflon meer vervormen aan de randen dan in het midden (zandloper) terwijl Latex juist meer vervormt in het midden, wat niet de verwachting is. Bij deze hoogte vervormen ook Plastic en Plastic op Teflon meer aan de randen dan in het midden.



Figuur 4.63: Permanente radiale rek over de hoogte bij H=100 mm

De in het midden gemeten radiale rekken en vervormingen liggen voor deze hoogte veel dicht bij elkaar dan in de metingen hiervoor (Tabel 4.25).

Tabel 4.25: Gemeten radiale rekken (elastisch en plastisch) in midden proefstuk bij alle systemen voor H=100 mm

H=100 mm N=40	elastisch		plastisch	
	midden	$\mu\epsilon$	midden	$\mu\epsilon$
GEEN	6,32	2	20,03	1
LATEX	9,36	5	26,52	5
TEFLON	6,21	1	20,77	2
PLASTIC	7,31	3	24,76	4
PLASTIC&TEFLON	7,59	4	22,76	3

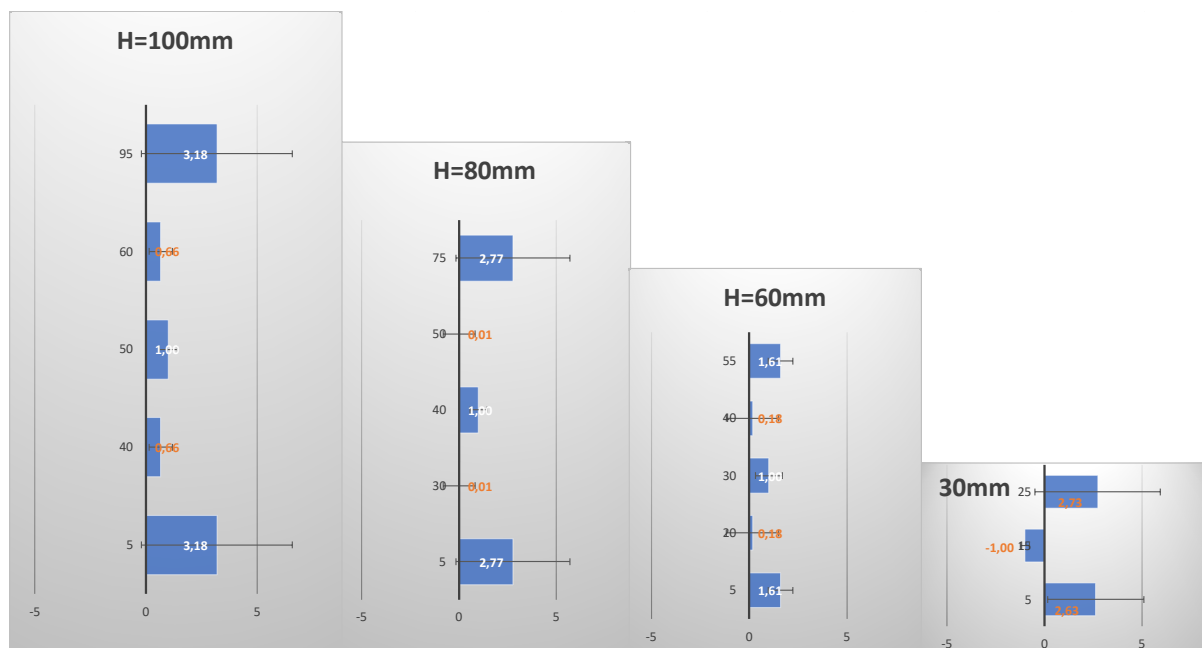
De orde grootte van de elastische rekken is nu voor alle systemen in de buurt van de referentie ($9 \mu\epsilon$, paragraaf 3.4), waarbij Latex er het dichtste bij zit en “Geen reductie” en Teflon er het verst vanaf.

4.4 Resultaten per wrijvingsreductie systeem

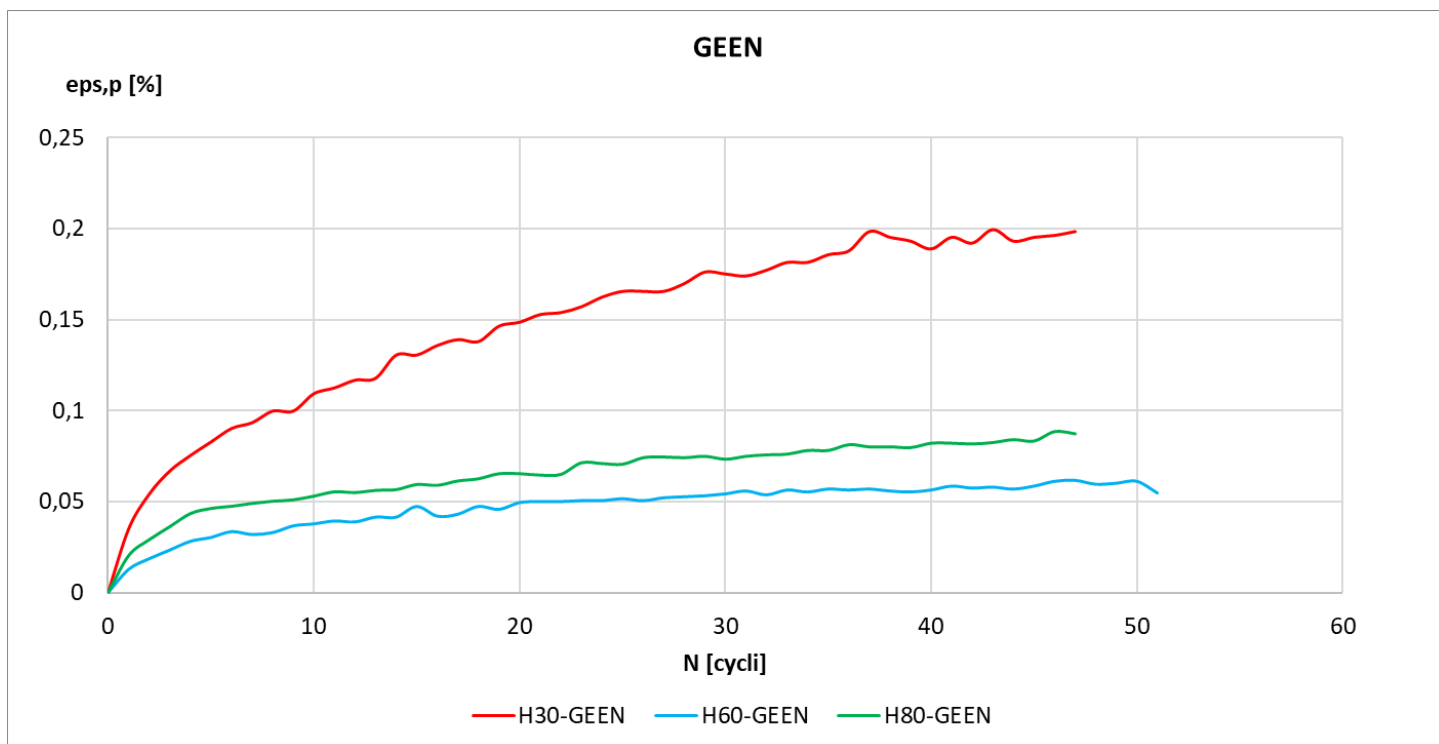
De resultaten per wrijvingsreductiesysteem geven een indruk van het effect van de proefstukslankheid (h/D ratio) per wrijvingsreductiesysteem.

4.4.1 Geen

Voor Geen wrijvingsreductie is het gedrag bij $h=60$ mm het meest uniform. Hoewel dat niet direct logisch lijkt, het effect van wrijving is in het midden kleiner bij slankere proefstukken, dus zal de tonvorming groter zijn en wordt het meest uniforme patroon verwacht bij $h=30$ mm, is het totale patroon bij $h=30$ mm vreemd, met een afname aan diameter in het midden.

**Figuur 4.64: Effect h/D op relatieve radiale plastische rek voor Geen wrijvingsreductie**

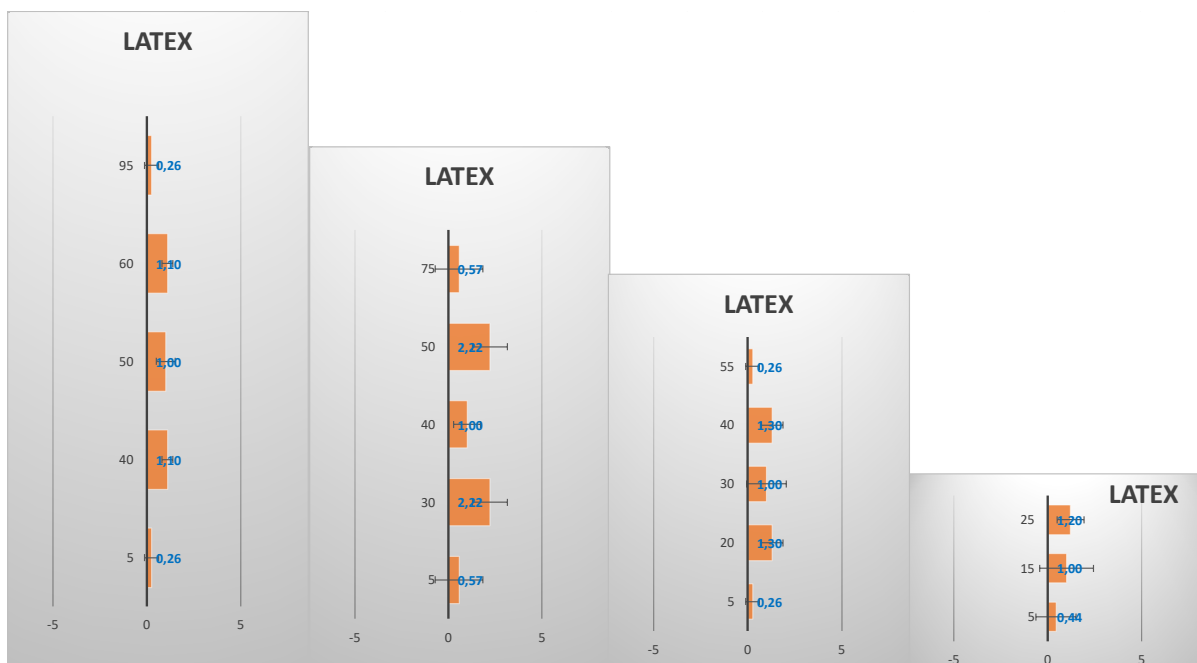
De axiale plastische rek is groter voor $h/D=0,3$ dan voor $h/D=0,8$ en die is groter dan $h/D = 0,6$, wat opvallend is.



Figuur 4.65: Effect h/D op axiale permanente rek voor Geen wrijvingsreductie

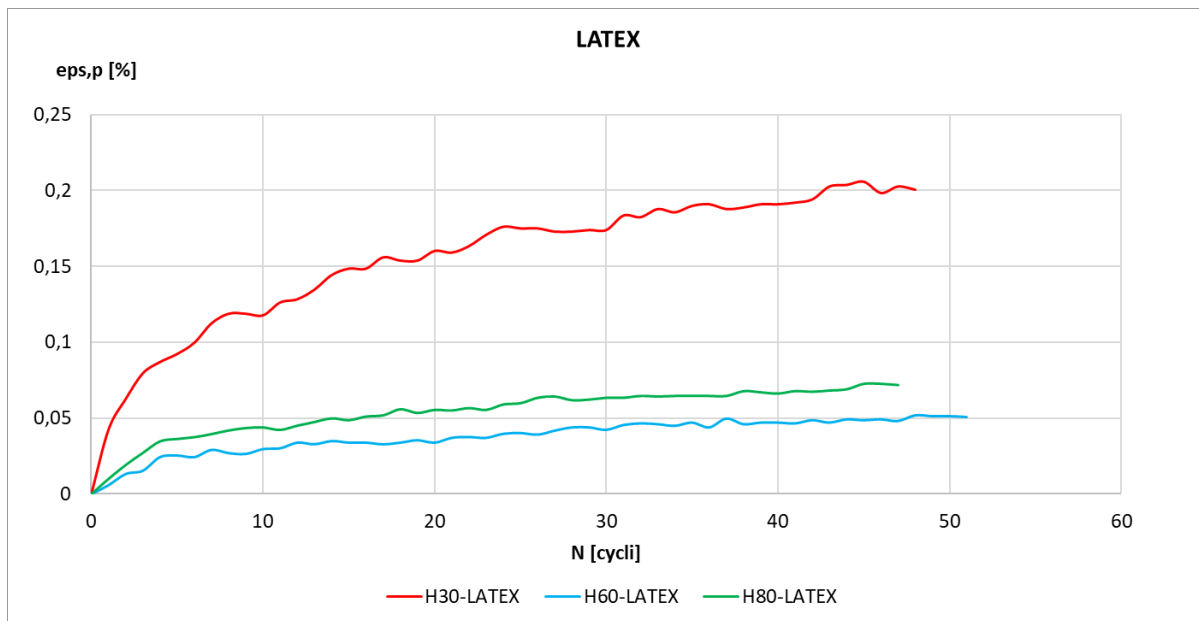
4.4.2 Latex

Bij Latex is de vervorming aan de randen voor alle h/D waarden klein, behalve bovenaan voor h=30 mm. Daar valt wel op dat er een groot verschil zit tussen de radiale rek bij de boven en de onderplaat.



Figuur 4.66: Effect h/D op relatieve plastische radiale rek voor Latex

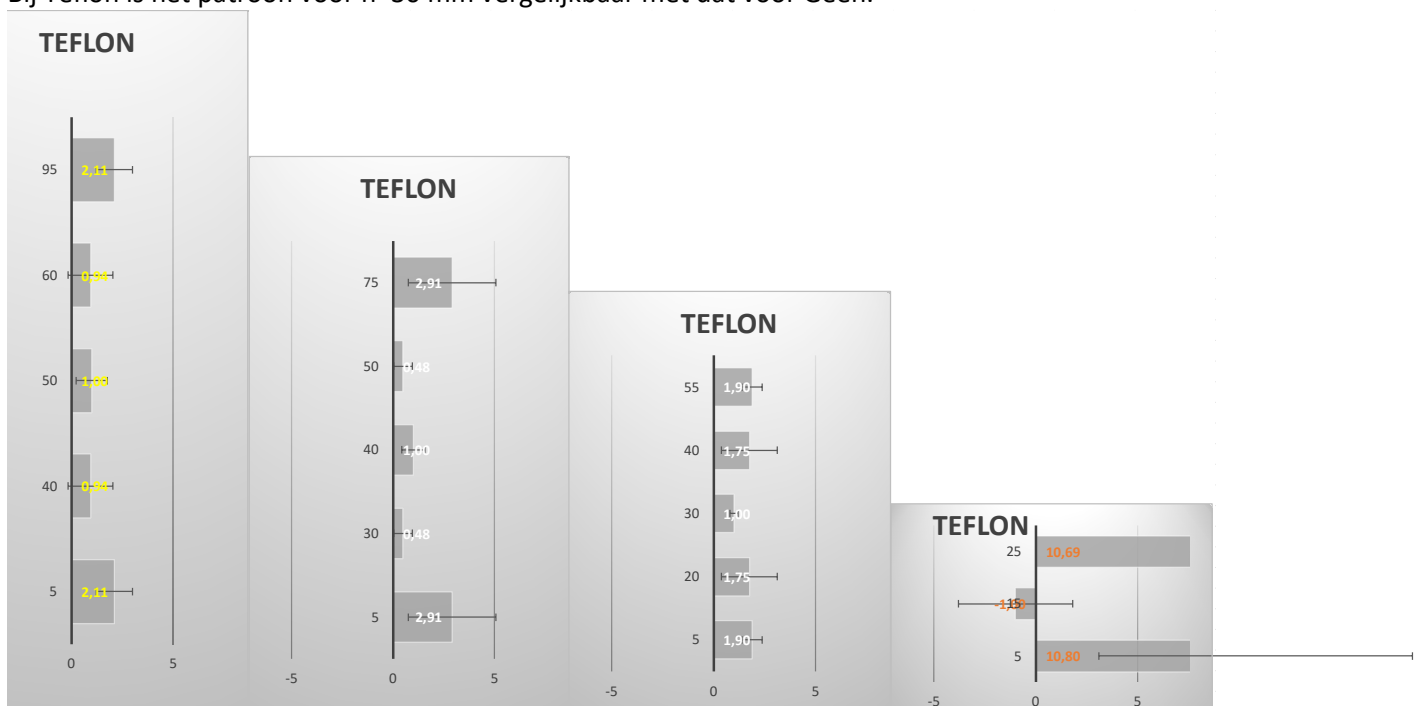
Het beeld voor de axiale rek is vergelijkbaar met dat voor “Geen reductie”.



Figuur 4.67: Effect h/D op axiale permanente rek voor Latex

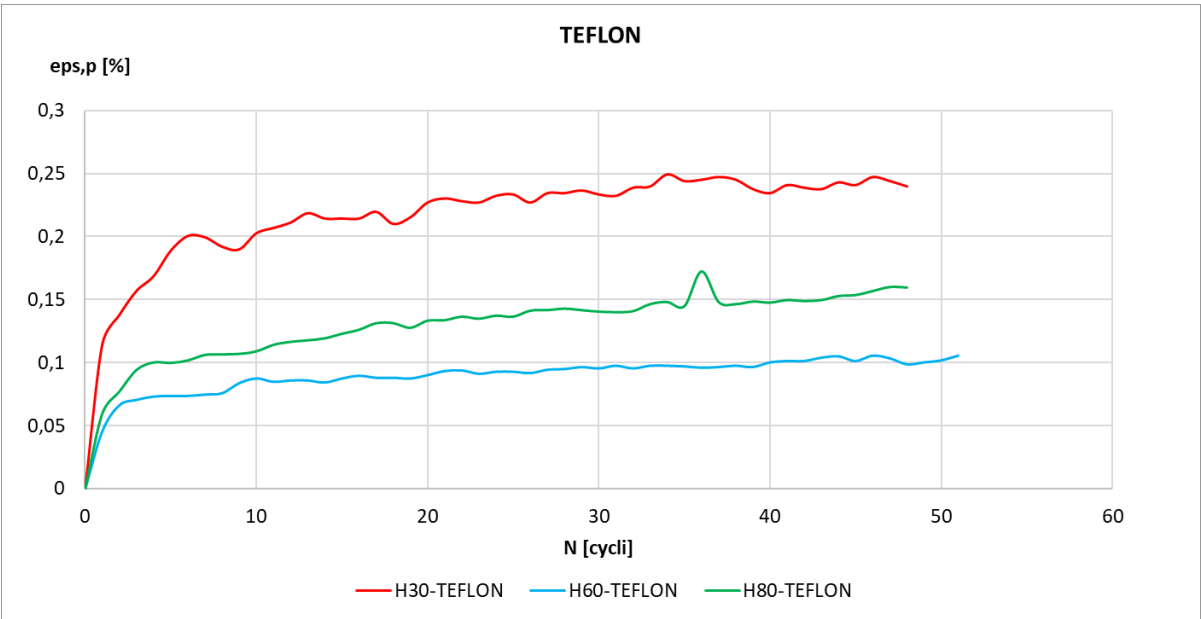
4.4.3 Teflon

Bij Teflon is het patroon voor h=30 mm vergelijkbaar met dat voor Geen.



Figuur 4.68: Effect h/D op relatieve blijvende radiale rek voor Teflon

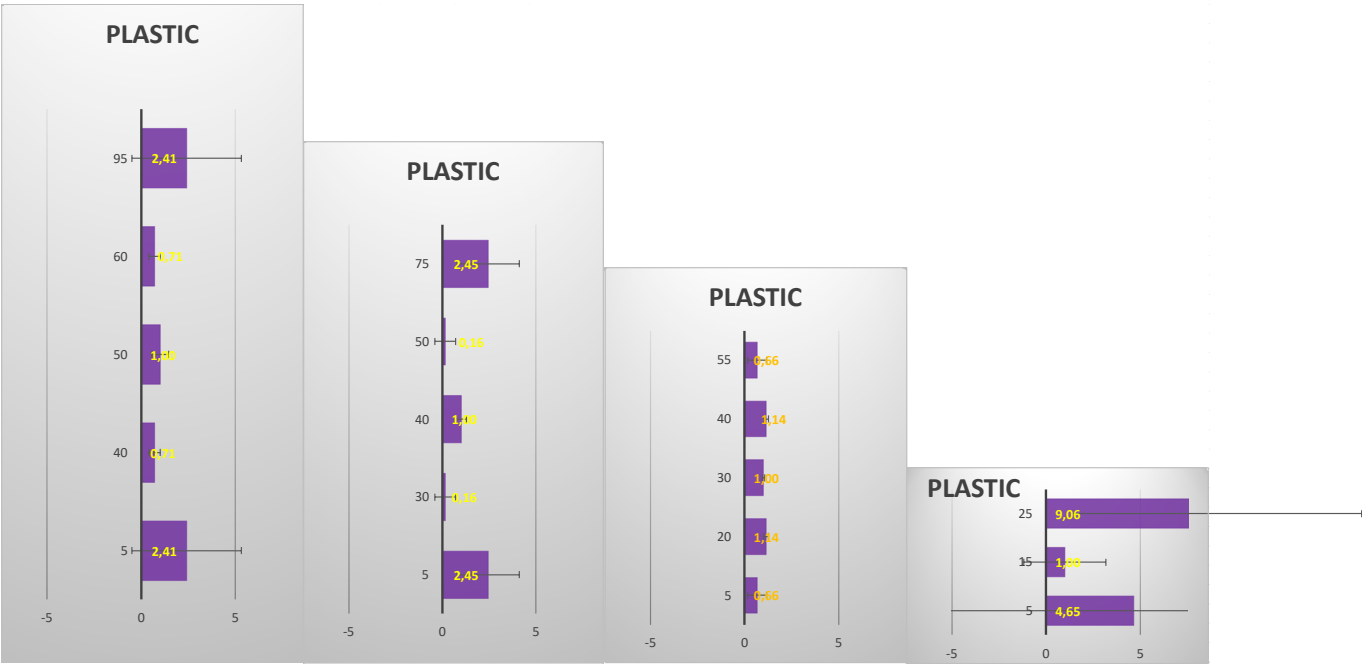
Ook hier is de trend in h/D op de axiale rek niet consistent over de hoogte, maar wel in vergelijking met de andere systemen.



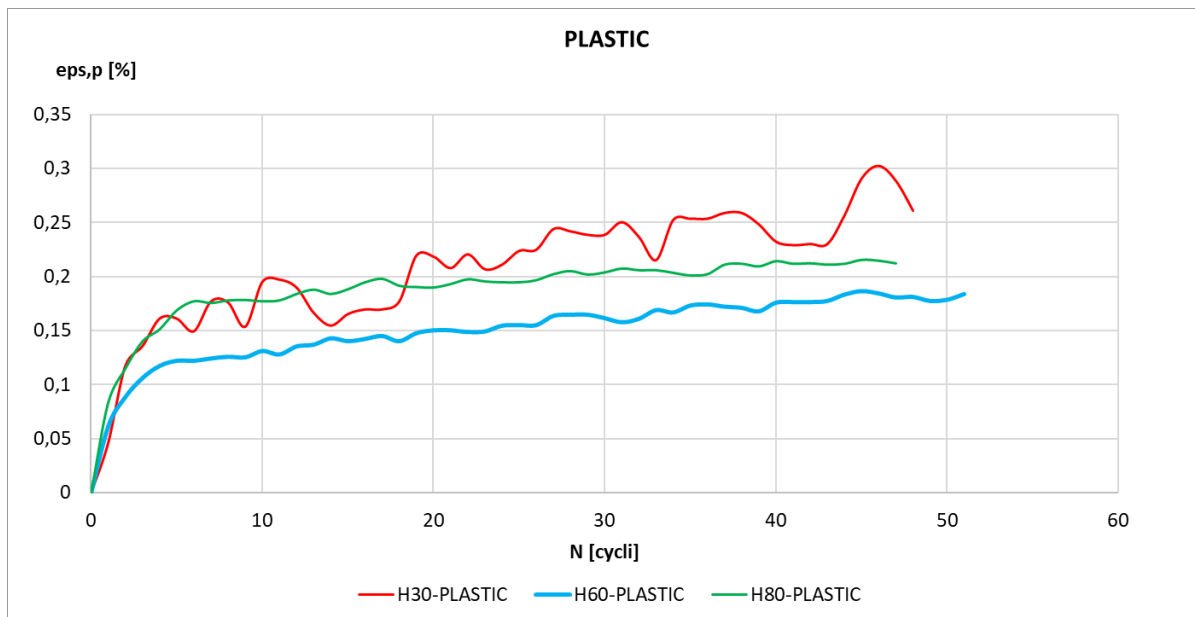
Figuur 4.69: Effect h/D op axiale permanente rek voor Teflon

4.4.4 Plastic

Voor h=30 mm is er een groot verschil tussen de radiale rek bij de boven- en onderplaat. H=60 is het proefstuk waarvoor de vervorming het meest uniform is.



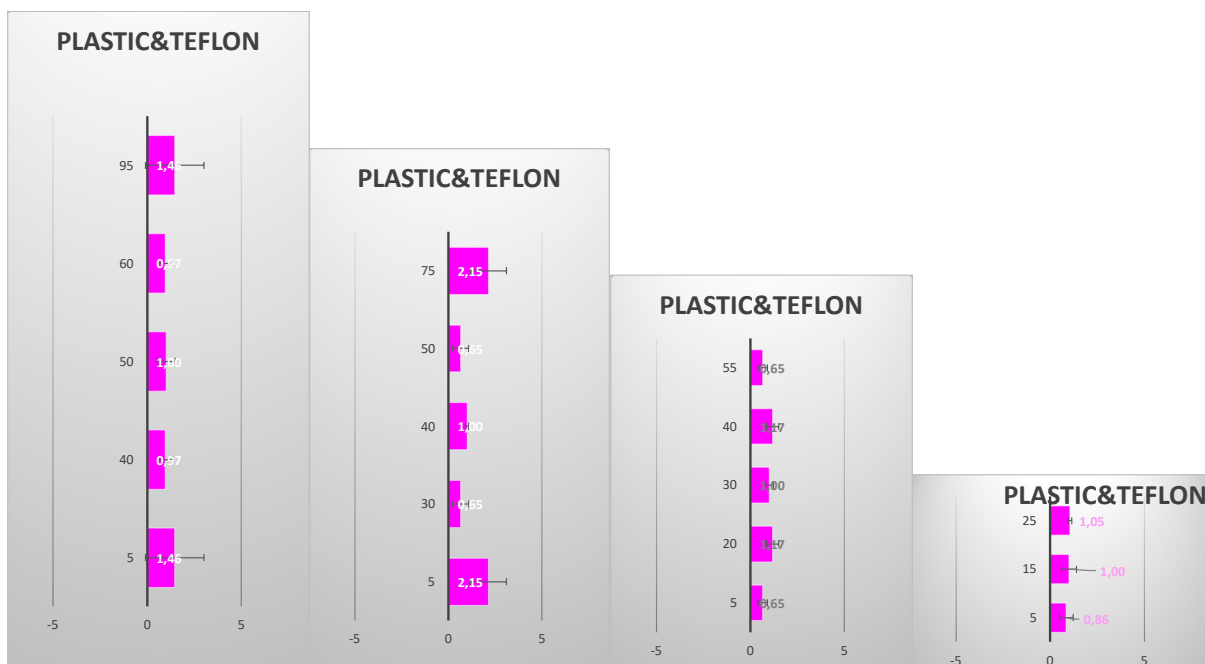
Figuur 4.70: Effect h/D op relatieve radiale permanente rek voor Plastic



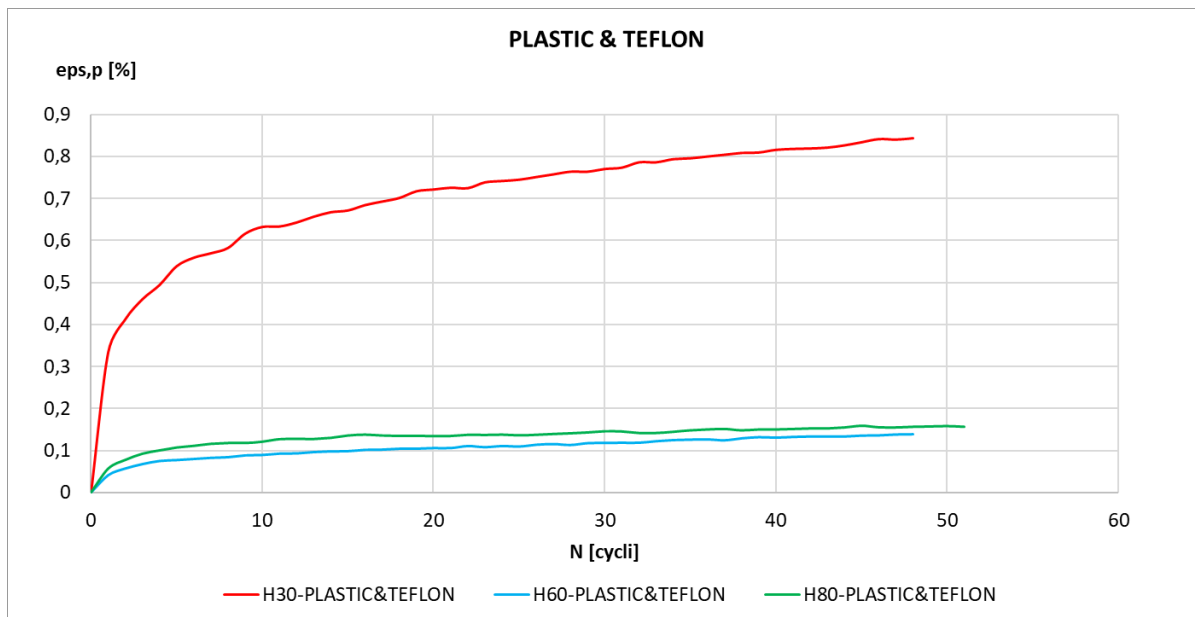
Figuur 4.71: Effect h/D op permanente axiale rek voor Plastic

4.4.5 Plastic&Teflon

Plastic op Teflon als wrijvingsreductie geeft voor alle h/D waarden een redelijk uniform vervormingspatroon. De axiale vervorming is voor dit systeem bij h=30 mm verrassend groot.



Figuur 4.72: Effect h/D op de relatieve radiale permanente rek voor Plastic op Teflon



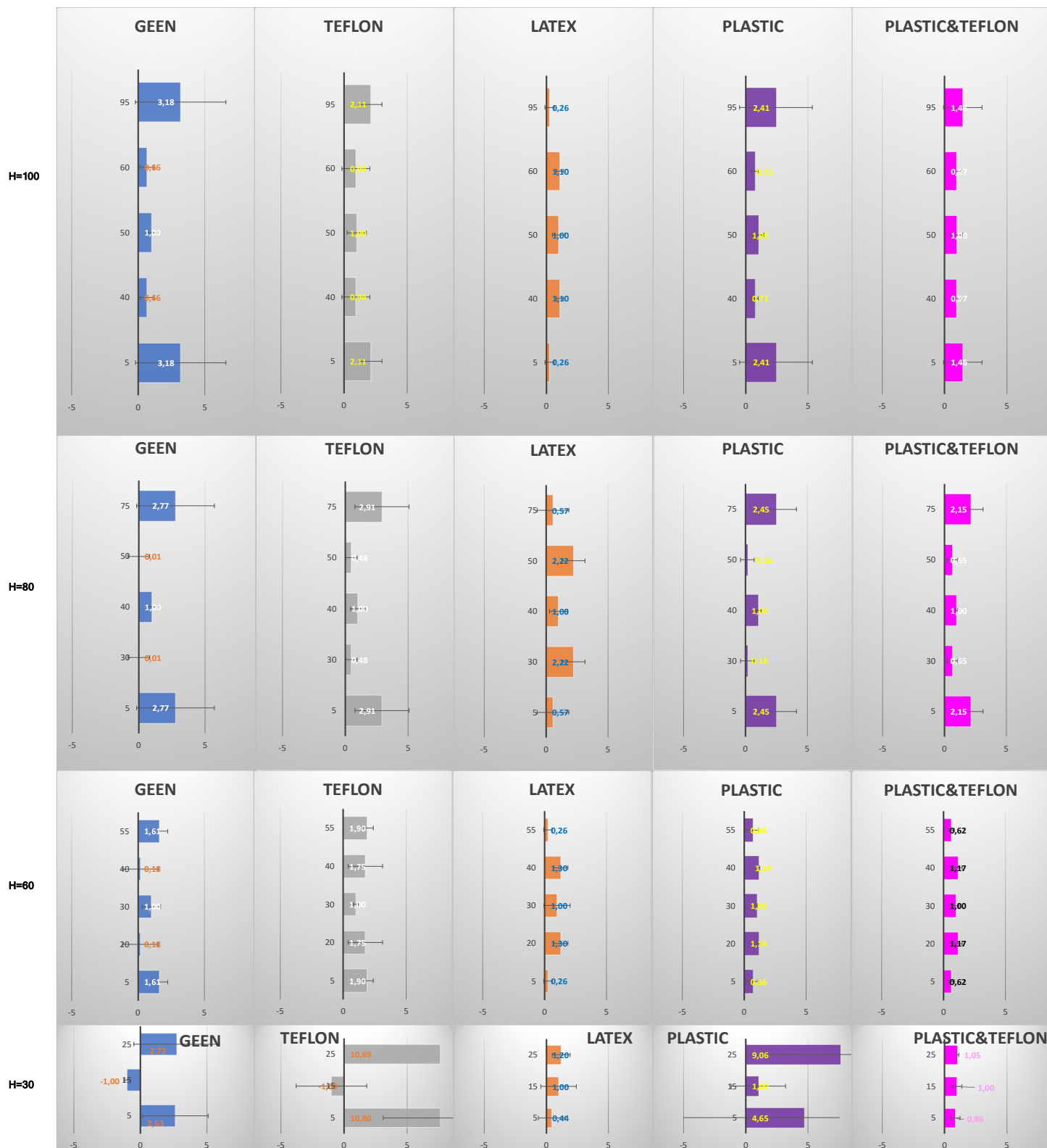
Figuur 4.73: Effect h/D op de permanente axiale rek voor Plastic op Teflon

4.5 Totaal

In deze paragraaf worden de hiervoor gegeven resultaten bij elkaar gezet. In Figuur 4.73 staan de relatieve radiale rekken op de verschillende hoogtes voor de vier h/D waarden en de vijf wrijvingsreductiesystemen samen uitgezet op dezelfde schaal. Hieruit blijkt dat Plastic op Teflon in alle h/D verhoudingen het meest uniforme patroon laat zien.

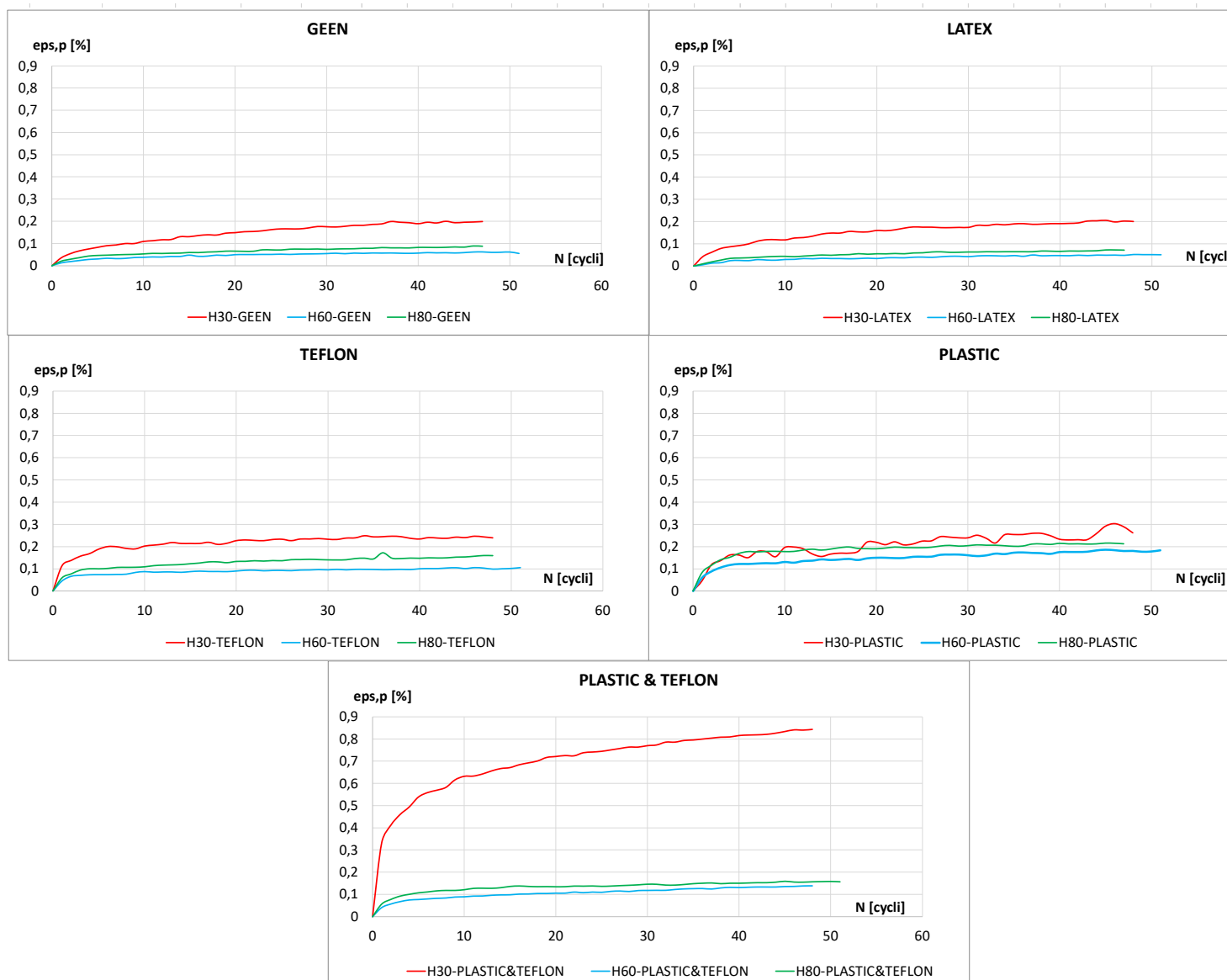
Ook is te zien dat voor alle systemen uitgezonderd latex voor h/D=0,6; 0,8 en 1,0 meer vervorming bij de platen wordt gemeten dan in het midden. Dat is vreemd, aangezien juist bij Latex geldt dat de stijfheid van het wrijvingsreductiesysteem lager is dan die van asfalt, dus hier zou theoretisch trek kunnen ontstaan in het contactvlak. Voor de andere systemen zou dit niet moeten gebeuren, zeker niet voor "Geen reductie". In de volgende paragraaf wordt ingegaan op zowel waarom dit onverwacht is, als op mogelijke verklaringen.

Daarnaast vertonen de meeste systemen en h/D verhoudingen een omslag in de grootte van de permanente horizontale rek tussen het midden en de rand, waar een continue verloop verwacht wordt. Tenslotte valt op dat de vervormingspatronen bij h=30 mm onverwacht zijn, deels asymmetrie, deels contractie in plaats van uitzetting. Ook op deze waarnemingen wordt in de volgende paragraaf dieper ingegaan.



Figuur 4.74: Overzicht relatieve permanente radiale rekken voor alle systemen en proefstukhoogtes

In Figuur 4.75 zijn de permanente axiale rekken gegeven voor alle systemen op dezelfde schaal. Zoals te zien is, is deze rek het grootst voor $h/D=0,3$ en ligt de rek voor $h/D=0,8$ tussen $h/D=0,3$ en $h/D=0,6$ in voor alle metingen. Voor $h/D=0,3$ en Plastic op Teflon is de axiale permanente vervorming aanzienlijk groter dan voor de andere combinaties.



Figuur 4.75: Axiale permanente rekken per wrijvingsreductiesysteem voor alle h/D waarden (m.u.v. $h/D=1$, geen axiale metingen)

4.6 Discussie/Analyse

Zoals in de vorige paragrafen te zien is, zijn sommige resultaten nogal verrassend. Bijvoorbeeld het proefstuk met $H=30$ mm en geen wrijvingsreductie, waarbij in het midden een verkleining van de omtrek/diameter optreedt. Dit is onlogisch onder druk. Ook zijn de axiale blijvende vervormingen bij het toepassen van Latex klein, terwijl er in eerdere onderzoeken juist grote waarden werden gevonden. In deze paragraaf wordt ingegaan op de resultaten en mogelijke verklaringen voor de gevonden resultaten.

4.6.1 Overzicht hypothesen en resultaten

In Tabel 4.26 zijn de radiale plastische rekken in het midden van het proefstuk (gemeten waarden), de relatieve radiale rekken aan de rand en in het midden (ten opzichte van gemeten waarde in het midden) en de axiale permanente rekken gegeven voor alle h/D en wrijvingsreductiesystemen voor $N=40$.

Ook de hypothesen zijn in de deze tabel opgenomen, hierna wordt beschreven hoe de tabel is opgezet. De tabel bestaat uit een aantal delen. Elk deel heeft een donkerblauwe rij met witte tekst waarin is benoemd welk

aspect in de onderstaande rijen staat, bijvoorbeeld de radiale plastische rek in het midden voor het bovenste deel. Daaronder staat telkens een lichter blauwe rij met de vijf wrijvingsreductie systemen. In de volgende rij, met witte achtergrond, staan de hypothesen voor dat aspect. Voor de radiale plastische rek in het midden is de verwachting dat deze het grootst (MAX) is voor “Geen wrijvingsreductie”. In die situatie wordt de radiale uitzetting bij de platen verhinderd, dus die is klein, ervan uitgaande dat het totale volume ongeveer gelijk blijft, zal de uitzetting in het midden dan groter zijn dan wanneer de uiteinden ook vervormen. Bij Latex is de verwachting dat de uiteinden wel vervormen en mogelijk zelfs op trek worden belast, de radiale rek in het midden zal daar dan het kleinste (MIN) zijn van de verschillende wrijvingsreductie systemen. Voor Teflon wordt verwacht dat de vervorming in dezelfde orde grootte ligt als voor “Geen wrijvingsreductie” (~GEEN), terwijl voor Plastic en Plastic&Teflon (P&T) verwacht wordt dat de radiale plastische rek in het midden in de orde grootte zal liggen van die van Latex (~LATEX).

Voor de verhouding radiale rek bij de rand ten opzicht van die in het midden geldt dat bij uitbuiken die verhouding <1 is, dat is daarom de hypothese voor “Geen wrijvingsreductie” en “Teflon”. Als er zandloper vorming optreedt kan deze verhouding >1 zijn, dat is dus de hypothese voor Latex. Voor beide systemen met plastic is de verwachting dat de vervorming redelijk uniform is, dus ~ 1 . Hetzelfde geldt, in iets minder sterke mate, voor de rekken op 10 mm boven het midden ten opzicht van die in het midden.

Voor de axiale permanente rek geldt tenslotte dat door de extra steun aan de randen de vervorming van “Geen wrijvingsreductie” kleiner zal uitvallen en door trek aan de uiteinden voor Latex juist groter. De andere systemen zitten naar verwachting in de orde grootte van “Geen wrijvingsreductie” (Teflon) of Latex (Plastic en Plastic&Teflon). De achtergrond voor deze hypothesen is eerder in het rapport gegeven (paragraaf 2.2.2, pagina 14 en verder).

In de rijen onder de hypothesen staan de daadwerkelijke waarden voor elke proefstuk hoogte. Een rode achtergrond geeft aan dat het resultaat in die cel niet overeenkomt met de hypothese, groen komt wel overeen en oranje zit er tussen in.

In het bovenste deel van de tabel zien we dat de hypothesen voor “Geen wrijvingsreductie” en Latex verworpen worden voor $H=30$ mm en niet verworpen voor $H=60$ en 80 mm. Voor $H=30$ mm is het resultaat omgekeerd aan wat verwacht werd, “Geen wrijvingsreductie” heeft de kleinste radiale plastische rek in het midden (die is zelfs negatief) en Latex heeft de grootste. Teflon zit weliswaar in de richting van het resultaat van “Geen wrijvingsreductie”, met een negatieve rek, maar ligt maar iets dichterbij dit systeem dan bij Latex. Plastic op Teflon ligt weliswaar in de buurt van het resultaat van Latex, maar omdat dat resultaat niet conform Voor $H=100$ mm zijn de resultaten niet conform de hypothese, want de rek voor “Geen wrijvingsreductie” is het kleinste en voor Latex het grootste, maar alle waarden liggen relatief dicht bij elkaar vandaar dat alles hier oranje scoort.

In het tweede deel, met betrekking tot de tonvorming, zijn op één na alle resultaten in tegenspraak met de hypothesen. Het gaat hier om de verhouding tussen de radiale plastische rek op 5 mm van de plaat en die in het midden.

Het derde deel kijkt ook naar tonvorming, maar door de rek 10 mm boven het midden te vergelijken met het midden. Voor de laagste proefstukken (30 mm) hebben we hier geen resultaat, omdat 10 mm boven het midden hier gelijk is aan 5 mm van de belastingplaat. Deze proefstukken hebben dus rekstroken net boven de onder- en net onder de bovenplaat. In het tweede deel van de tabel is het gemiddelde van deze rekstroken gebruikt als het signaal bij de plaat. Voor de andere h/D waarden is in dit derde deel van de tabel relatief veel groen te zien. Hier sluiten de resultaten meestal aan op de hypothese. Waarom dit zo zou kunnen zijn wordt in de volgende paragraaf besproken.

Tabel 4.26: Overzicht resultaten ten opzichte van de hypothesen (N=40 cycli)

RADIALE PLASTISCHE REK MIDDEN					
	GEEN	LATEX	TEFLON	PLASTIC	P&T
hypothese	MAX	MIN	~GEEN	~LATEX	~LATEX
H=30	-55,74	58,62	-9,05	13,68	52,34
H=60	37,70	28,06	21,01	29,13	28,15
H=80	36,62	21,95	29,53	43,73	32,62
H=100	20,03	26,52	20,77	24,76	22,76
RATIO RADIALE PLASTISCHE REK RAND/MIDDEN					
	GEEN	LATEX	TEFLON	PLASTIC	P&T
hypothese	<1	>1	<1	~1	~1
H=30	2,68	0,82	10,74	6,85	0,95
H=60	1,61	0,26	1,90	0,66	0,65
H=80	2,77	0,57	2,91	2,45	2,15
H=100	3,18	0,26	2,11	2,41	1,46
RATIO RADIALE PLASTISCHE REK M+10/MIDDEN					
	GEEN	LATEX	TEFLON	PLASTIC	P&T
hypothese	<1	>1	<1	~1	~1
H=30	***	***	***	***	***
H=60	0,18	1,30	1,75	1,14	1,17
H=80	0,01	2,22	0,48	0,16	0,65
H=100	0,66	1,10	0,94	0,71	0,97
AXIALE PERMANENTE REK					
	GEEN	LATEX	TEFLON	PLASTIC	P&T
hypothese	MIN	MAX	~GEEN	~LATEX	~LATEX
H=30	0,19	0,19	0,23	0,23	0,82
H=60	0,06	0,05	0,10	0,18	0,13
H=80	0,08	0,07	0,15	0,21	0,15
H=100	***	***	***	***	***

Voor het laatste deel van de tabel, de axiale permanente rek, voldoen de resultaten van “Geen wrijvingsreductie” aan de hypothese, deze zijn namelijk het kleinste. Voor Latex wijken de signalen af van de verwachting, want hier wordt de grootste rek verwacht terwijl de waarden juist heel dicht bij die van “Geen wrijvingsreductie” liggen. Mede hierdoor scoren de andere drie systemen voornamelijk oranje, want hoewel Teflon lage vervormingen geeft, ligt het verder van “Geen wrijvingsreductie” dan Latex. En hoewel Plastic en Plastic&Teflon grotere waarden geven, liggen deze niet in de buurt van Latex, maar juist van Teflon. De axiale rek bij Plastic&Teflon en H=30 mm is voor de waarde niet direct logisch, je verwacht hier meer vervorming en dat zie je ook, maar de verwachte vervorming zou in de buurt maar lager van de vervorming van Latex zijn en het is juist veel groter.

In de rest van deze paragraaf worden de resultaten nader bekeken en wordt onderzocht wat verklaringen kunnen zijn voor de onverwachte resultaten.

4.6.2 Discussie en analyse radiale signalen

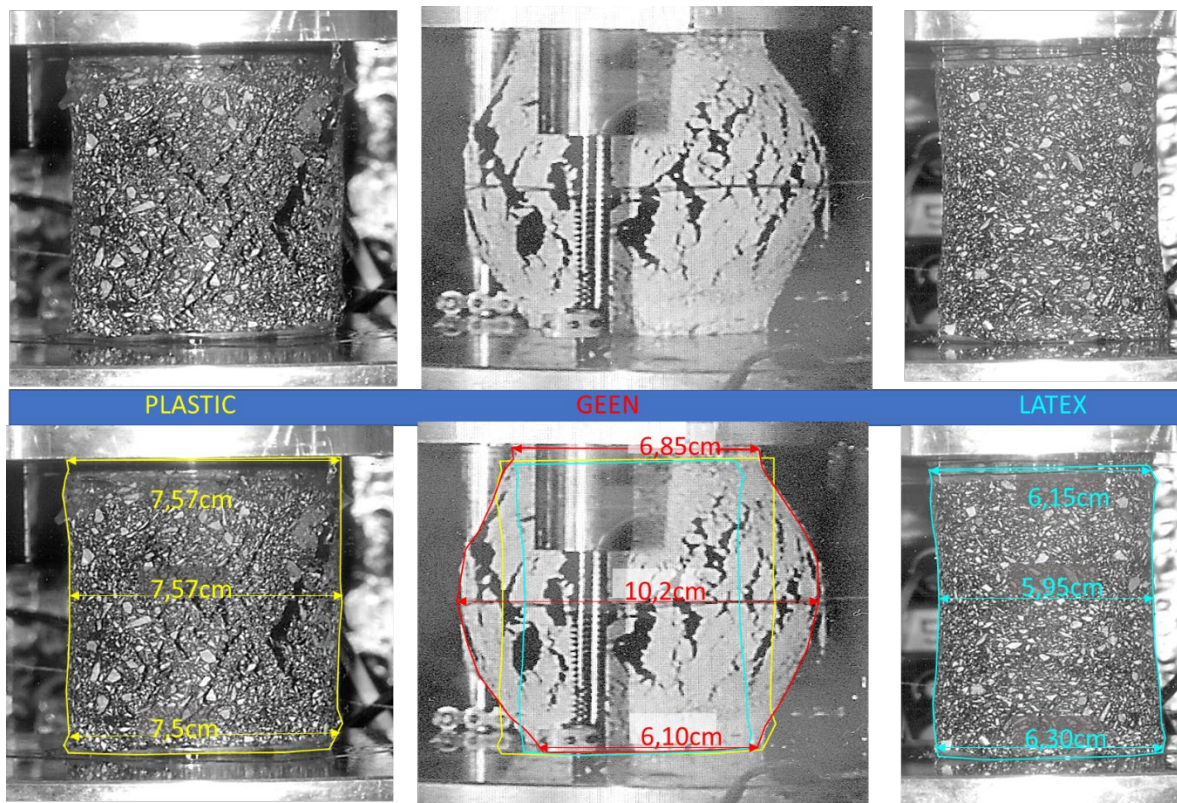
Voor de radiale plastische rek in het midden was de verwachting dat deze het grootst zou zijn voor “Geen reductie” en het kleinste voor Latex, met Teflon dicht bij “Geen reductie” en beide systemen met Plastic dicht bij Latex. Voor H=30 geeft “Geen reductie” juist de kleinste radiale vervorming (de diameter neemt hier zelfs af), terwijl Latex de grootste toename laat zien. Teflon laat ook nog een contractie in het midden zien. Deze

wijken dus allemaal af van de hypothese en hebben daarom een rode achtergrond in de cellen in de tabel. Voor de twee plastic systemen ligt het wat lastiger, Plastic heeft weliswaar een kleine vervorming in het midden, maar omdat Latex afwijkt van de verwachting en de hypothese voor de Plastic systemen was dat deze dicht bij Latex zouden liggen, is toch aangegeven dat Plastic niet en Plastic op Teflon wel aan de hypothese voldoet. Kijkend naar de verwachting (hypothese: in de buurt van de kleinste waarde) in plaats van gemeten waarde voor Latex, zou dit ook andersom gezien kunnen worden. Dan zou Plastic oranje scoren, omdat de kleinste waarden toch nog een stuk kleiner (namelijk negatief) zijn.

Voor de controle op tonvorming, wordt gekeken naar zowel de verhouding van de radiale permanente rek aan de rand ten opzichte van die in het midden als die rek 10 mm boven het midden ten opzichte van het midden. Voor “Geen reductie” en Teflon is de verwachting tonvorming, dus dan is de rek aan de rand kleiner dan in het midden. Voor Latex kan zandlopervorming optreden, de rek aan de rand is dan groter dan in het midden. Voor de beide systemen met Plastic is een redelijk uniforme vervorming te verwachten voor de ratio van rand ten opzichte van het midden. Voor de verhouding tussen de rek op 10 mm boven het midden en het midden geldt grofweg hetzelfde, waarbij deze waarde tussen de rand en die in het midden in zal liggen. Als functie van de slankheid zal het verschil tussen midden en M+10 mm vermoedelijk afnemen bij toenemende h/D voor de systemen met veel wrijving en minder effect hebben bij de effectieve systemen.

Kijkend naar het tweede deel van Tabel 4.26 valt op dat geen van de resultaten aansluit bij de hypothese, hoewel die gebaseerd zijn op resultaten uit het verleden. Voor het derde deel van de tabel (ratio M+10 mm t.o.v. M) voldoet ongeveer twee derde van de resultaten aan de verwachtingen. Het is verleidelijk om dan te concluderen dat er dus iets mis is met de metingen aan de rand, maar zonder verdere onderbouwing is dat niet uit de data te halen. Vandaar dat een nadere analyse nodig is.

Op grond van deze resultaten is gekeken naar foto's van bezwijkproeven op asfalt met verschillende wrijvingsreductiemethoden en zijn op het oog de diameters aan de randen en in het midden vergeleken (Figuur 4.75). De foto's zijn destijds gemaakt om het vervormingsprofiel te laten zien, maar niet voor een directe vergelijking, het is dan ook niet bekend of de foto's gemaakt zijn bij dezelfde mate van verticale vervorming of dat deze foto's horen bij proeven bij dezelfde temperatuur en belastingsnelheid. Vandaar dat alleen relatief vergeleken kan worden. De linkse en middelste proefstukken maken deel uit van de proeven waaruit de sterkte is bepaald ($h/D=2$ uit (Erkens and Poot 2000) en Figuur 2.3). De waarden zijn gecombineerd met die van (Bolk 1980) en resultaten uit dit onderzoek in Tabel 4.27.



Figuur 4.76: Vergelijking radiale vervorming bezwijkproeven

De vergelijking laat duidelijk zien dat de resultaten aan de randen voor dit onderzoek niet aansluiten op de hypothesen opgesteld op grond van onder andere het werk van Bolk en Erkens.

Tabel 4.27: Vergelijking radiale vervormingen over het proefstuk voor verschillende onderzoeken en condities

	$(\epsilon_{top} + \epsilon_{bottom})/2 \quad \epsilon_{centre}$					
Systeem	Bolk	Erkens	Dit onderzoek	$\epsilon_{rand}/\epsilon_{midden}$	Dit onderzoek	$\epsilon_{M+10}/\epsilon_{midden}$
	(h/D=0,6)	(h/D=2)	(h/D)=1	(h/D=0,6)	(h/D)=1	(h/D=0,6)
Geen smeermiddel	0.39	0,635	3,18	1,61	0,66	0,18
Teflon	0.67		2,11	1,90	0,94	1,75
Grafietvlokken en vet	0.70					
rubbermembranen met vet	1.05	1,047	0,26	0,26	1,10	1,3
Plastic met zeep		0,995	2,41	0,66	0,71	1,14

Mogelijke verklaringen moeten dan ook worden gezocht in verschillen tussen deze onderzoeken:

- Opgelegde signalen: de kruipproef is een statische proef en bezwijkproeven zijn monotoon, terwijl de metingen in dit onderzoek dynamisch zijn, het herhaald belasten en terugveren (uitzetten en terugveren) zou een andere interactie met wrijving en wrijvingsreductie kunnen hebben dan continue toenemende vervormingen
- In dit onderzoek is telkens met een nieuwe systeem aan hetzelfde proefstuk gemeten, terwijl de andere proeven per conditie 1 proefstuk hebben onderzocht tot einde proef
- de metingen van deze onderzoeken zijn gedaan met rekstroken terwijl het bij de andere onderzoeken gedaan is door achteraf opmeten met een schuifmaat of door opmeten. Naast het verschil in de meetmethode geeft dit nog een verschil: vanwege het lijmen zitten de rekstroken niet exact aan het

uiteinde van het proefstuk, maar op 5mm daar vandaan, terwijl de handmatige bepalingen wel aan de uiteinden gedaan zijn.

Deze mogelijke verklaringen worden hierna (in omgekeerde volgorde) uitgebreid besproken.

4.6.2.1 Effect rekstroken

Rekstroken worden met lijm op het proefstuk bevestigd en meten over het gebied waarop ze zijn aangebracht, gedurende de proef. Bij opmeten wordt er na afloop van de proef een meting gedaan. Daarbij wordt het totale gedrag van de diameter in kaart gebracht, de rekstroken meten over een deel van de omtrek en dat resultaat wordt gemiddeld, waarbij de heterogeniteit van het proefstuk en eventuele ongelijkmatige vervormingen invloed kunnen hebben op het gemiddelde signaal. Daarnaast zijn rekstroken bedoeld om te meten in de richting waarin ze zijn aangebracht, maar zijn ze ook gevoelig in de richting loodrecht daarop (variatie in rek in die richting beïnvloed de verandering in weerstand en dus het meetsignaal).

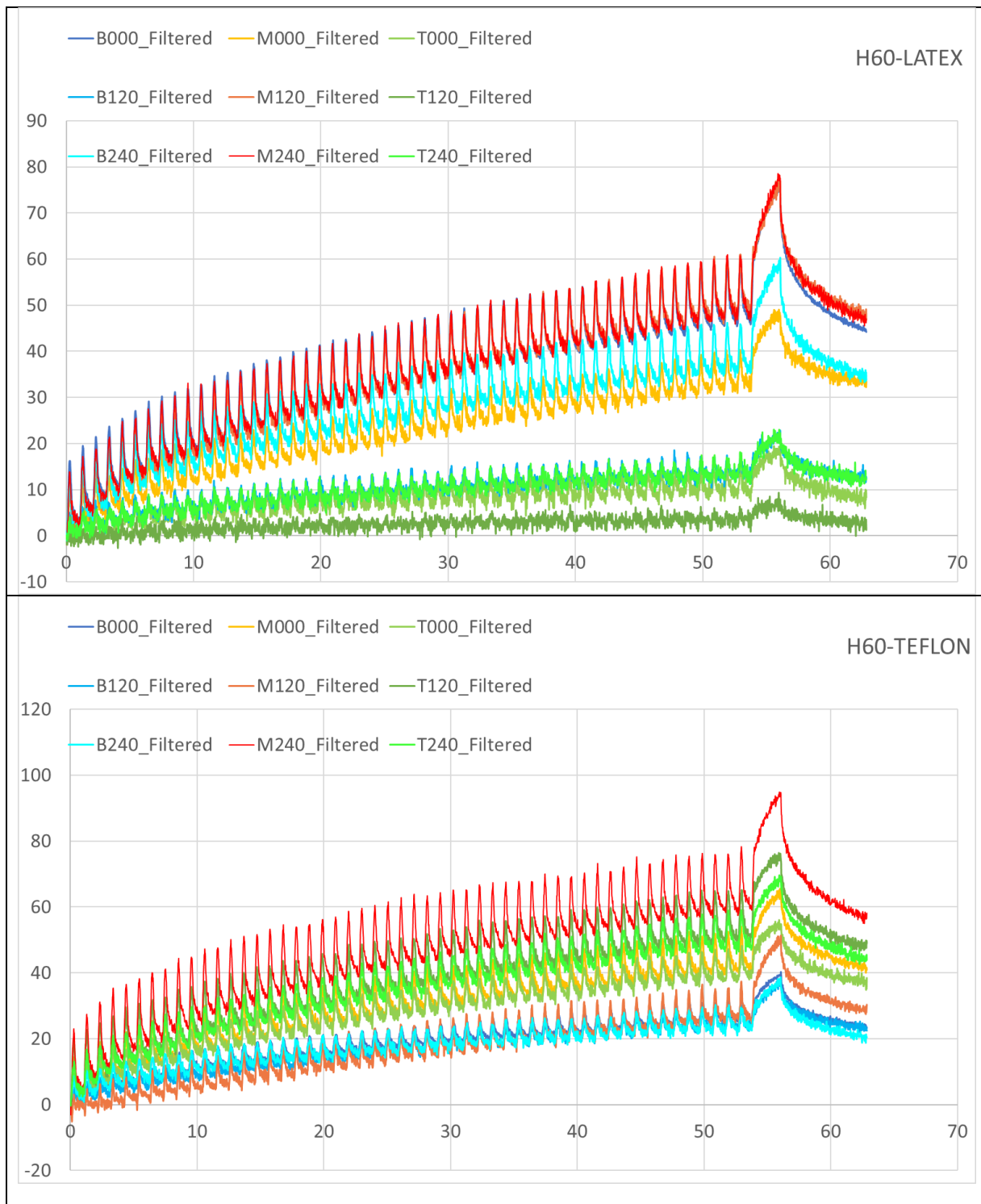
4.6.2.1.1 Variatie rekstrooksignalen

Eerst wordt gekeken naar de optredende variatie in de rekstrook metingen op dezelfde hoogte, de heterogene samenstelling van het materiaal zou er in theorie toe kunnen leiden dat op de ene hoogte twee of drie rekstroken op een steen zitten, en op een andere niet wat de signalen kan verstoren. Bij de selectie van de (lange) rekstroken is daar al rekening mee gehouden, maar het is zinvol te controleren of het werkt zoals beoogd.

Zoals al werd aangegeven door de grote variatie (2 x standaardafwijking in de gemiddelde signalen, zijn er grote verschillen tussen de rekstrooksignalen op dezelfde hoogte. In Figuur 4.78 zijn als voorbeeld de individuele signalen van de rekstroken op de drie hoogtes voor H=60 mm met Latex (boven) en Teflon (onder) getoond.

Bij Latex is het signaal bij de rand (T, groen) duidelijk kleiner dan dat in het midden, blauw) en 10 mm boven het midden (M, rood) en vallen de rekken in het midden binnen de extremen van de signalen 10 mm boven het midden. Bij Teflon liggen alle signalen dicht bij elkaar en is de variatie in de meting op 10 mm van het midden zo groot dat tot de 30° cyclus alle andere signalen daartussen vallen. Deze variatie is de verklaring voor de grote foutenbalken in de grafische weergaves van de permanente rekken, maar het verklaart niet waarom de waarden bij de randen ten opzicht van het midden zo afwijken van de verwachtingen. Ook wijst niets erop dat er sprake is van een effect van rekstroken die sterk beïnvloed worden door een steen, want dan zouden er rekstroken zijn die consequent een lage waarde geven en dat is niet wat er gebeurt. Zo vallen bij H=60 Latex het signaal van twee rekstroken op 10 mm van het midden (M120⁵ (oranje) en M240 (rood)) over elkaar en is M000 (geel) kleiner, terwijl voor Teflon juist M120 (oranje) de laagste waarde van de drie heeft.

⁵ Omdat de rekstroken M voor H=60, 80 en 100mm op 10mm boven het midden (B) zitten, zijn ze om overlap in de lijmzones 60° versprongen geplaatst van de rekstroken in het midden (B) en bij de rand (T). Feitelijk zitten ze dan dus niet op dezelfde 0, 120 en 240° graden lijnen als de andere zes, maar op 60, 180 en 300°



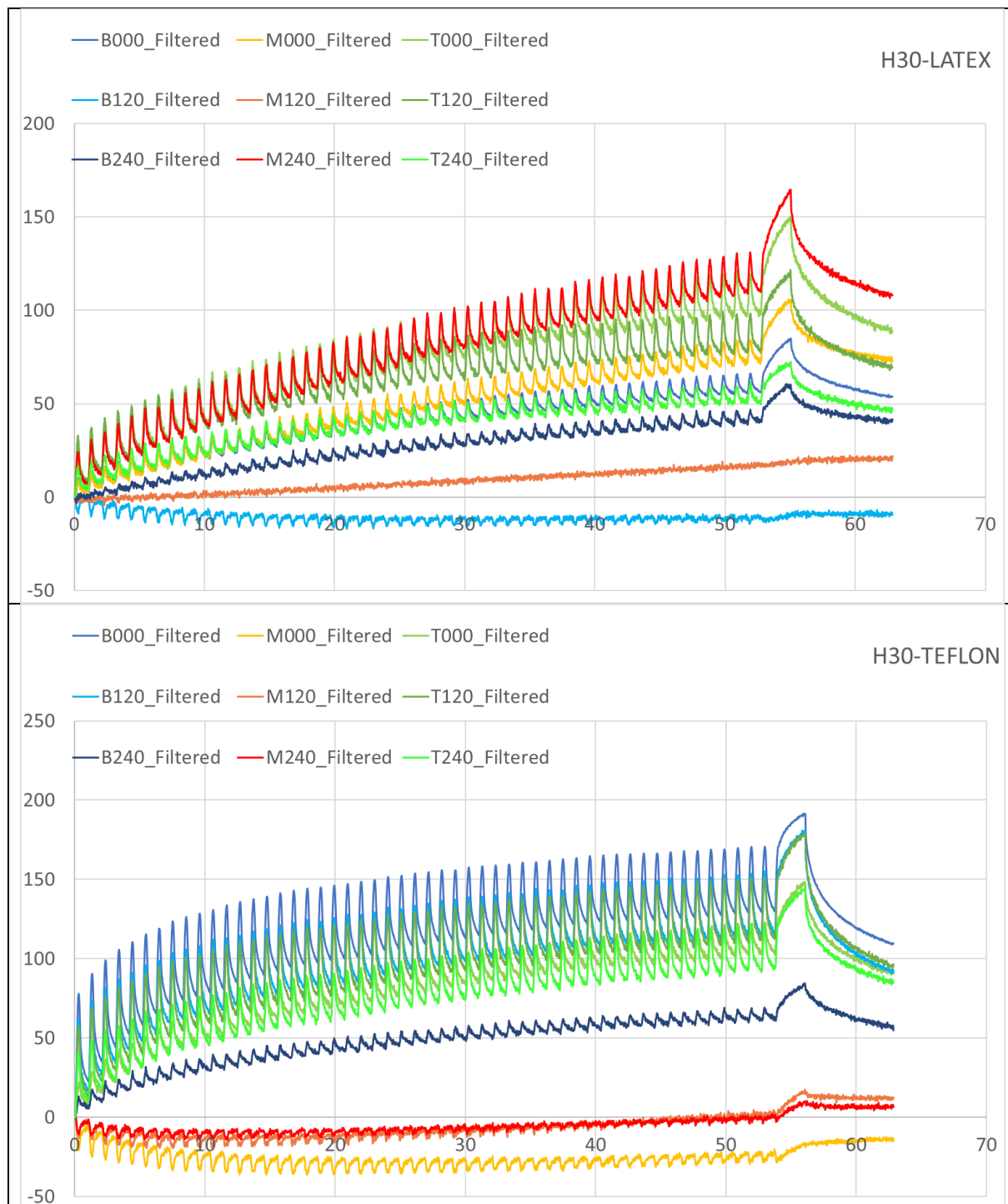
Figuur 4.77: individuele rekstrookmetingen voor H=60 mm met Latex (boven) en Teflon (onder)

Voor het proefstuk met H=30 mm zijn de rode signalen van de rekstroken (M, rood, oranje en geel) de signalen van rekstroken op het midden, omdat er hier rekstroken bij de boven en onderplaat zitten (zie paragraaf 3.2). Aandachtspunt is dat, door de beperkte proefstukhoogte bij H=30 mm de rekstroken in het midden versprongen zitten ten opzichte van de rek stroken aan de randen, een eventueel effect van heterogeniteit of scheefstand, zal hier dus extra opvallen omdat alle rekken vergeleken worden met het midden.

Voor dit proefstuk valt op dat B240 in beide gevallen een vergelijkbaar signaal geeft, hier kan het zinvol zijn om te kijken of er iets opvalt aan de locatie waar deze rekstrook zit. Verder geeft bij Latex M120 nauwelijks

een elastisch, maar wel een plastisch signaal. Als dat ook bij Latex zo zou zijn, zou deze rekstrook of kapot kunnen zijn, of grotendeels op steen kunnen zitten (al verwacht je dan niet echt plastische vervorming), maar bij Teflon is het signaal vergelijkbaar met M240.

Tenslotte valt op dat bij Latex een van de B-rekstroken (B120) sterk afwijkt van de andere twee, twee die uitzetting geven, terwijl er eentje krimp geeft. Dat wijst op asymmetrische vervorming van het proefstuk als geheel, wat op een probleem met de opstelling zou kunnen wijzen. Doordat dit fenomeen bij teflon niet optreedt lijkt dit hier echter niet het geval te zijn.



Figuur 4.78: Individuele radiale rekstrook signalen voor H=30mm en Latex (boven) en Teflon (onder)

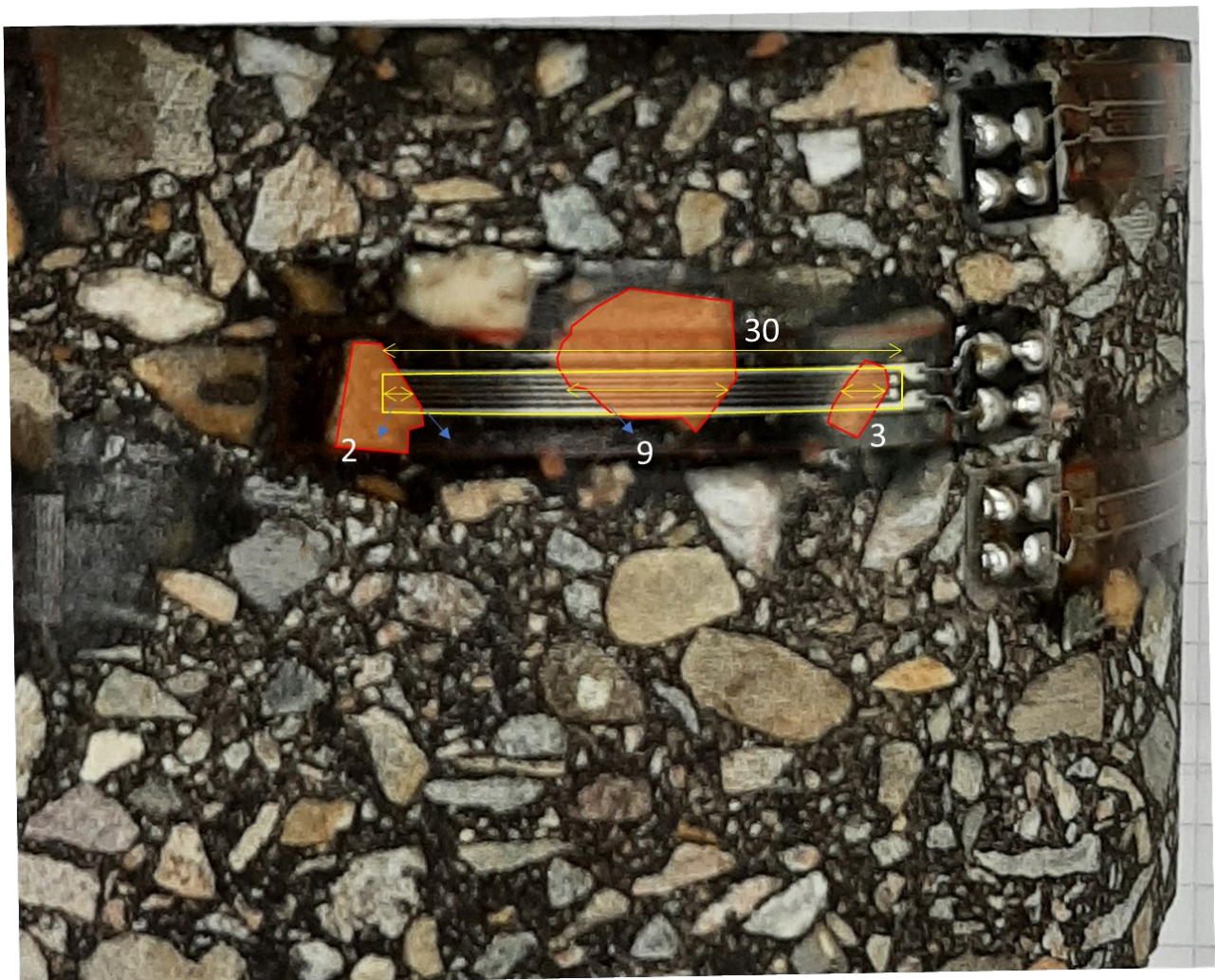
Bij Teflon liggen alle drie de rekstrooksignalen in het midden onder de as, het proefstuk **krimpt** dus in radiale richting in het midden. De andere rekstroken op B240 na liggen redelijk op elkaar. Bij Latex is de variatie in de midden rekstroken groot, ze omvatten bijna alle andere signalen. Ook hier is de variatie dus inderdaad groot, maar lijken er geen consistente trends te zijn die verklaren wat we zien.

In is een visuele beoordeling van de hoeveelheid steen onder de rekstrook weergegeven. Hierbij is op het oog bepaald hoeveel van het meetdeel van de rekstrook op steen zit. Voor elk proefstuk is dit per hoogte voor de drie rekstroken gegeven en gemiddeld.

Voor H=30 mm zitten de onderste rekstroken (B) op 5 mm boven de onderplaat (en op 10 mm onder het midden), de M-rekstroken op het midden van het proefstuk (60 graden versprongen ten opzichte van de andere twee hoogtes) en T op 5 mm onder de bovenplaat (en 10 mm boven het midden).

Voor H=60, 80 en 100 mm zitten de B-rekstroken op het midden van het proefstuk, M op 10 mm boven het midden (en 60 graden versprongen) en de bovenste (T) rekstroken zitten op 5 mm onder de bovenzijde van het proefstuk en daarmee ook 5 mm onder de bovenplaat.

Over de meetlengte van 30 mm is per rekstrook bepaald hoeveel hiervan over stenen gaat, zoals aangegeven in Figuur 4.79.



Figuur 4.79: Visuele beoordeling percentage steen onder de rekstrook

De individuele lengtes steen per rekstrook zijn gemiddeld over de drie rekstroken per hoogte (B, M en T) en gedeeld door 30 mm om op een gemiddeld steenpercentage per rekstroken op een gegeven hoogte uit te komen.

Tabel 4.28: Lengte en gemiddelde percentage steen onder elke rekstrook

H [mm]	rekstrook	Onderste rekstrook (B)	Middelste rekstrook (M)	Bovenste rekstrook (T)
30	0° (60° voor M) [mm]	12	14	14
	120° (180° voor M) [mm]	11	5	13
	240° (300° voor M) [mm]	22	4	4
	Gemiddeld: [% van 30mm]	50,0	25,6	34,4
60	0° (60° voor M) [mm]	14	11	3
	120° (180° voor M) [mm]	14	5	14
	240° (300° voor M) [mm]	12	21	8
	Gemiddeld: [% van 30mm]	44,4	41,1	27,8
80	0° (60° voor M) [mm]	6	10	11
	120° (180° voor M) [mm]	10	17	16
	240° (300° voor M) [mm]	23	14	13
	Gemiddeld: [% van 30mm]	43,3	45,6	44,4
100	0° (60° voor M) [mm]	3	15	7
	120° (180° voor M) [mm]	25	25	16
	240° (300° voor M) [mm]	22	16	5
	Gemiddeld: [% van 30mm]	55,6	62,2	31,1

Zoals uit Tabel 4.28 blijkt, zijn er inderdaad flinke verschillen tussen de steenpercentages onder de rekstroken, maar dit is niet logischerwijs gekoppeld aan de resultaten. Zo zijn, bijvoorbeeld, de percentages steen onder de Middelste rekstroken voor h=60 mm respectievelijk 11, 5 en 21%. Omdat hetzelfde proefstuk met dezelfde rekstroken op dezelfde locaties gebruikt is voor de metingen aan alle wrijvingsreductie systemen, zou het effect telkens vergelijkbaar moeten zijn. Zoals eerder geconstateerd (Figuur 4.77) zijn er juiste grote verschillen tussen de verhoudingen van de signalen van de rekstroken op één hoogte tussen de wrijvingsreductie systemen. In zijn de individuele waarden voor de middelste rekstroken (dus op 10 mm boven het midden van het proefstuk) gegeven voor drie systemen, waaronder de twee getoond in Figuur 4.77.

Tabel 4.29: Individuele reksignalen voor 3 wrijvingsreductie systemin bij h=60 mm voor puls 40

GEEN WRIJVINGSREDUCTIE				
locatie	elastisch	plastisch	totaal	% steen
60°	11	32	43	11
180°	-5	-18	-23	5
300°	5	5	10	21
LATEX				
locatie	elastisch	plastisch	totaal	%steen
60°	7	27	34	11
180°	14	41	55	5
300°	14	41	55	21
TEFLON				
locatie	elastisch	plastisch	totaal	%steen
60°	9	36	45	11
180°	10	21	31	5
300°	16	52	68	21

Kijkend naar de steen percentages, zou de verwachting zijn dat de rekstrook op 180° telkens de hoogste rek zou meten (minste steen in meetgebied), die op 60° het middelste signaal en de rekstrook op 300° het kleinste signaal. Dat blijkt echter niet het geval. De stenen hebben mogelijk invloed op het signaal, maar verklaren niet de onverwachte resultaten die gevonden zijn.

4.6.2.1.2 Symmetrie over de hoogte

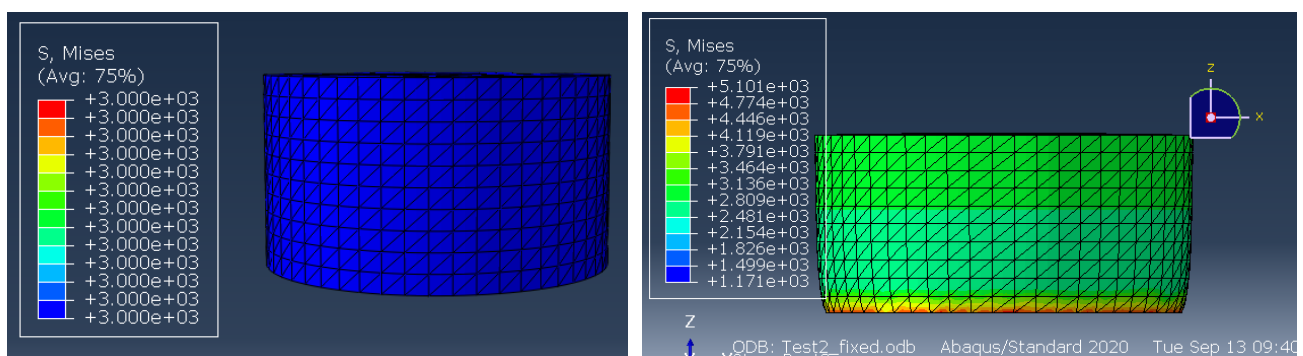
Bij de radiale vervormingen is het patroon over de proefstukken symmetrisch, zoals we dat ook in de andere proeven zien (Tabel 4.27). Dat is voor dit onderzoek echter kunstmatig, doordat de rekstroken allemaal op een helft van het proefstuk zitten, er is alleen vanaf het midden tot aan de bovenplaat gemeten en de resultaten zijn voor de weergave gespiegeld onder de aanname dat de vervorming min of meer symmetrisch is. Nu de resultaten afwijken van de verwachtingen, is het zinvol om deze aanname te toetsen en dat kan doordat bij het proefstuk met $h=30$ mm de rekstroken symmetrisch over de hoogte zitten (Figuur 3.1). Daarom zijn in de radiale plastische rekken bij de boven- en onderplaat gegeven voor de verschillende wrijvingsreductiesystemen bij $h=30$ mm, met de daaruit bepaalde ratio tussen de rek bij de boven- en onderplaat. De kleuren in de onderste rij geven aan hoever de ratio afligt van 1, de verwachte (ideale) waarde bij symmetrische vervorming. Hieruit blijkt dat Teflon en "Geen reductie" het meest symmetrisch vervormen, terwijl Latex het meeste afwijkt. Verder valt op dat op Teflon na (en dat verschil is heel klein) alle proefstukken meer vervormen aan de bovenkant dan aan de onderkant, wat zou kunnen wijzen op een temperatuurverschil of ruwheidsverschil tussen de platen. Dat het effect bij "Geen reductie" en Latex maar beperkt door werkt, zou weer met de wrijving te maken kunnen hebben, maar dat is strijdig met het feit dat de vervorming in de contactvlakken bij deze systemen groter is dan bij Latex.

Tabel 4.30: Ratio radiale vervorming boven en onderaan proefstuk, $H=30$ mm

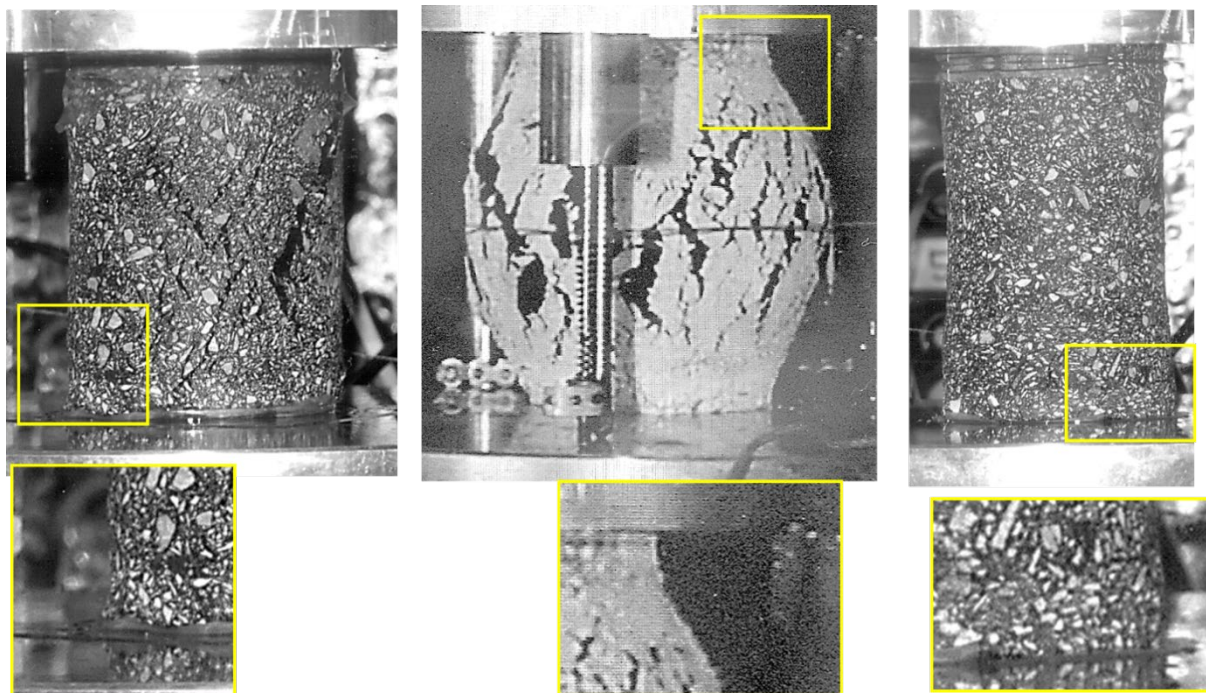
RATIO RADIALE PLASTISCHE ONDER EN BOVENPLAAT					
H=30	GEEN	LATEX	TEFLON	PLASTIC	P&T
boven	151,92	70,25	96,75	123,91	54,89
onder	146,60	25,63	97,74	63,66	45,05
boven/onder	1,04	2,74	0,99	1,95	1,22

4.6.2.1.3 Vervormingen dwars op de rekstroken

Het punt van de transversale gevoeligheid van rekstroken kan van invloed zijn als de vervorming niet is zo als verondersteld in de hypothesen. De verwachtingen voor de vervorming zijn gebaseerd op homogeen, isotropisch gedrag, zoals weergegeven in . Bij het bepalen van de vervormingen in midden en rand uit de foto's viel op dat het verloop van de vervorming bij de platen niet helemaal conform de verwachting was (Figuur 4.80), schematisch is dit weergegeven in Figuur 4.81. Het verloop van de kromming van de proefstukken bij de platen is anders dan het in theorie zou zijn, minder geleidelijk. Dit geeft wisselende buigvervorming dwars op de rekstroken, het is bekend dat dit effect heeft op rekstrook metingen, maar de mate waarin kan alleen bepaald worden als bekend is wat de lokale vervorming in dwarsrichting is en dat is niet het geval. Wat uit deze details ook duidelijk wordt, is dat deze kromming net boven de plaat plaats vindt. Dat is, vanwege de lijm, precies de plaats waarop de rekstroken in de buurt van de plaat zitten. Dit wijst er op dat met name deze resultaten met zorg bekeken moeten worden.

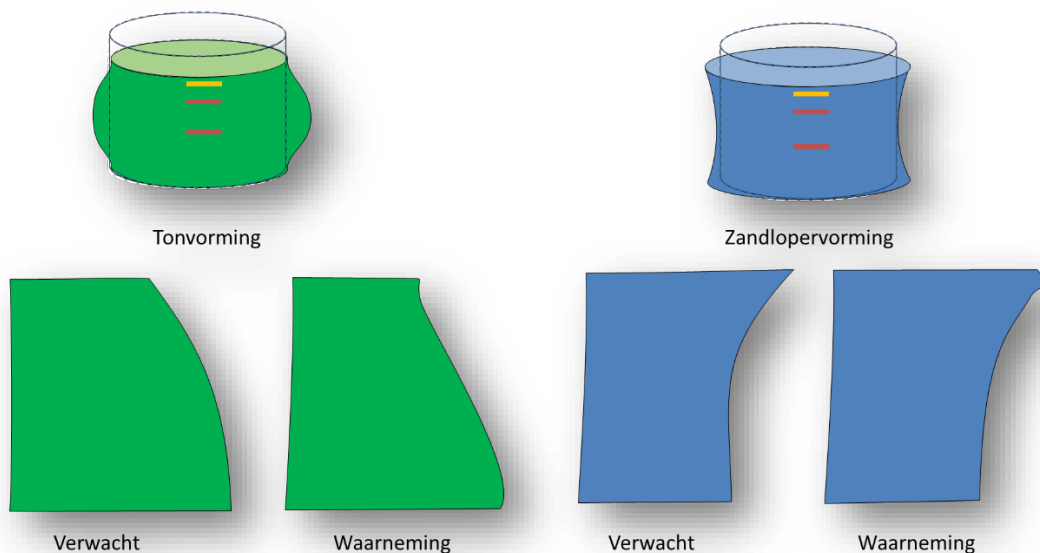


Figuur 4.80: Vervormingen en von Mises spanningen in een drukproef met (rechts) en zonder (links) wrijving in het contactvlak (figuur geeft onderste helft proefstuk, elastisch gedrag bij blokpuls, spanning gedurende "rust" met contactspanning van $3kPa=3000$ Pa, door verschil in schaal komt blauw links overeen met licht groen rechts: ca 3000 Pa)



Figuur 4.81: Details proefstukvervorming

Bij positieve kromming zal de rekstrook in de breedte worden uitgerekt, bij negatieve kromming ingedrukt. Zeker indien de radiale vervorming zelf klein is, kan dit effect mogelijk invloed hebben, dit hangt af van de verhouding tussen de axiale en transversale gevoeligheid van de rekstroken en natuurlijk de grootte van het effect.



Figuur 4.82: Schematisering details proefstuk vervorming

4.6.2.2 Statisch/Monotoon versus dynamisch

Het zou kunnen dat de wrijvingsreductie systemen anders functioneren in een cyclische dan in een monotone of statische proef. In een cyclische proef wordt de opgebouwde vervorming grotendeels weer prijsgegeven aan het eind van een cyclus. Het zou kunnen dat dit een systeem meer of minder efficiënt maakt, bijvoorbeeld wanneer vet is weggedrukt en er daardoor bij vervolg cycli minder wrijvingsreductie is. Hoewel denkbaar, lijkt

het niet direct voor de hand liggend en is het ook lastig voor te stellen hoe dit zou leiden tot grotere vervormingen in de contactvlakken bij Geen wrijvingsreductie. Er is weliswaar de nodige ervaring met Latex als systeem in cyclische triaxiaalproeven voor asfalt, maar daarbij wordt alleen de axiale permanente rek gemeten. Het is dan ook zinvol om de axiale resultaten te vergelijken om hier iets over te zeggen.

Een ander verschil tussen deze proeven en de proeven waarop de hypothesen gebaseerd zijn is het gebruik van een opsluitmedium. Hoewel het niet voor de hand ligt dat er invloed is van het medium (meestal lucht of water) is dit niet op voorhand uit te sluiten en zouden sommige systemen bij gebruik van met name water beter kunnen werken dan zonder. Kanttekening hierbij is dat bij de monotone bezwijkproeven in het ACRé project ook geen opsluit medium gebruikt is en dat daar resultaten gevonden zijn die aansluiten bij andere onderzoeken.

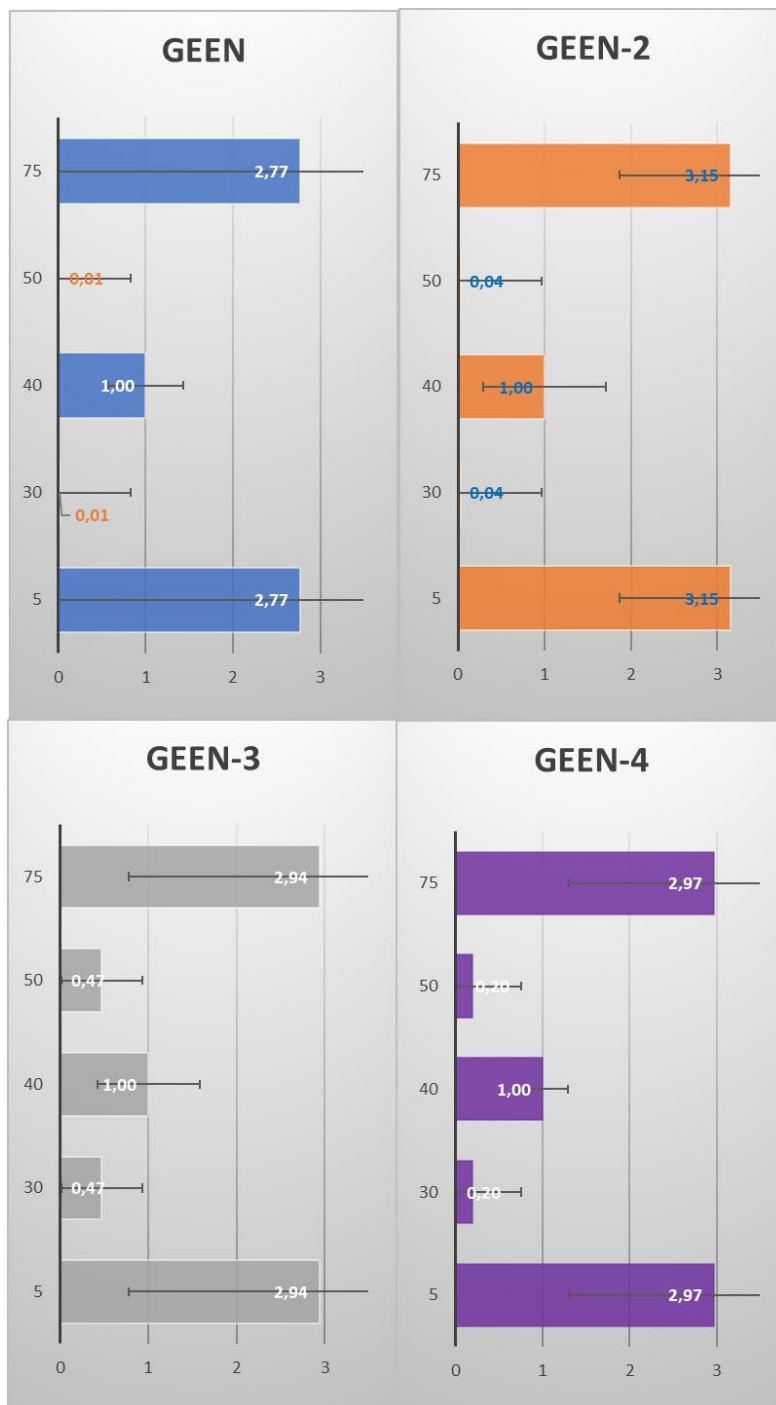
4.6.2.3 Herhaalde proeven op hetzelfde proefstuk

Wat bij de verschillen in resultaten ook mee zou kunnen spelen, is het feit dat de proefstukken herhaald gebruikt worden, weliswaar maar voor een beperkt aantal lastherhalingen, maar het zou kunnen dat blijvende vervormingen uit de eerdere proeven invloed hebben op het gedrag. Doordat de extra optredende plastische axiale vervorming kleiner wordt als functie van N , zal ook de toename in de radiale rek kleiner worden en dit zou een rol kunnen spelen. Als dat zou is, zou het patroon bij gelijke beproevingsvolgorde gelijk zijn, wat niet zoveel zegt, maar bij verschillen in beproevingsvolgorde zou een effect op kunnen treden dat eerder geteste wrijvingsreductiesystemen een relatief grotere permanente axiale en radiale rek vertoont. In Tabel 4.28 is de testvolgorde per proefstuk gegeven. De opzet was om alle systemen per hoogte een keer te testen, maar zoals uit de tabel blijkt zijn er in sommige gevallen meerdere metingen gedaan. De in het rapport gebruikte metingen zijn steeds de eersten en die zijn voor $H=30$, 60 en 80 mm in dezelfde volgorde gedaan, de volgorde bij $H=100$ mm wijkt af. Als de volgorde invloed heeft, is de verwachting dat eerder in de reeks de vervormingen groter zullen zijn. Doordat er voor $H=100$ mm geen axiale metingen zijn en dit de enige hoogte is waar de volgorde afwijkt, is hier niet direct iets over te zeggen.

Tabel 4.31: Beproeivingsvolgorde per hoogte

Hoogte [mm]	testvolgorde
30 mm:	G1-L-T-D-G2-DT-G3-L2-T2-D2-DT2-D3-D4
60 mm:	G1-L-T-D-DT-G2
80 mm:	G1-L-T-D-DT-G2-G3-D3-DT4-G4
100 mm:	G1-DT-D-L-T-G2-D2

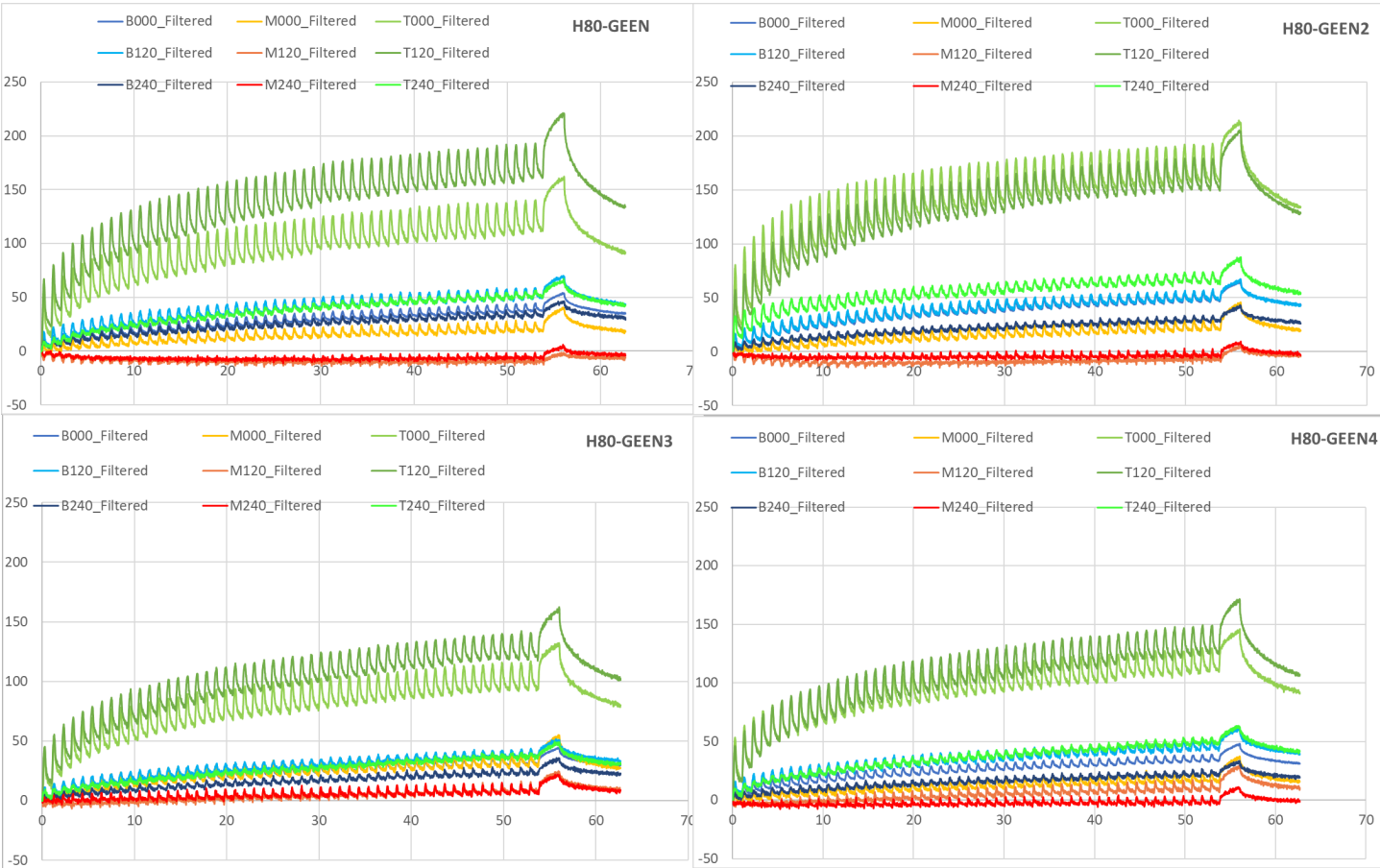
Om een indruk van een eventueel effect van de volgorde te krijgen, is gekeken naar G1 tot en met G4 bij $H=80$ mm. G1 zit aan het begin van de reeks, G4 aan het eind met G2 en G3 direct na elkaar aan het einde van de in het rapport geanalyseerde proeven. In Figuur 4.80 zijn de radiale rekken voor deze metingen gegeven. De figuur laat zien dat de relatieve rekken hetzelfde patroon vertonen: bij de randen groter dan in het midden, 10 mm boven de rand kleiner. De volgorde van testen verklaart dus niet de onverwachte beelden in de vervormingen. Wel valt op dat de rekken op 10mm van het midden voor G3 en G4 een stuk grote uitvallen (relatief) dan voor G1 en G2, als is dit bij G3 groter dan bij G4.



Figuur 4.83: Radiale permanente rek in N=40 voor 4 herhalingen voor Geen bij H=80 mm

De individuele radiale signalen vertonen ook in hoofdlijnen hetzelfde verloop (Figuur 4.81). Er zijn verschillen in de ligging van de signalen, zoals meer verschil tussen T000 en T120 voor G1 (Geen) dan voor G2, maar over het algemeen zijn de trends hetzelfde. Wel lijken de signalen minder groot te worden bij meerdere herhalingen. Dit blijkt ook uit Tabel 4.30, waar de elastische en plastische rekken in puls 40 voor de vier herhalingen vergeleken worden. Zowel de elastische als de plastische rek zijn flink kleiner voor G3 en G4 dan voor G1 en 2. De verhouding tussen beiden blijft wel redelijk gelijk, ongeveer 0,2. Er is dus een effect van waar in de reeks een proef gedaan wordt, maar verrassend genoeg is het verschil tussen G1 en G2 vrij klein, terwijl daar de hele reeks andere systemen tussen zit qua beproeven, en zit er een flink verschil tussen G2 en G3, die na elkaar beproefd zijn. Ook hier is er dus wel een effect, maar verklaard dit niet de verschillen tussen de resultaten en de metingen. Controle van het test logboek wees uit dat er een dag zit tussen de testen **G1-L-T-**

D-DT-G2 en G3-D3-DT4-G4. De hier geconstateerde verschillen hangen dus waarschijnlijk samen met veranderingen in proefeigenschappen of condities in het lab door dat tijdsverloop.



Figuur 4.84: Individuele radiale reksignalen G1 t/m 4 h=80mm

Net als voor alle metingen bij 80mm zijn ook voor deze metingen de elastische rek amplitudes groot in vergelijking met de referentie waarde van $9\mu\epsilon$.

Tabel 4.32: Waarden elastische en plastische rek in puls 40 voor G1 t/m4 bij h=80mm

H=80 N=40	elastisch $[\mu\epsilon]$		plastisch $[\mu\epsilon]$	
	Midden		Midden	
GEEN	22,53	3	101,461	3
GEEN-2	24,29	4	118,3036	4
GEEN-3	15,67	1	76,59325	1
GEEN-4	16,85	2	86,4267	2

4.6.3 Axiale signalen

In het onderste deel van Tabel 4.26 (hieronder gereproduceerd als Tabel 4.31) is te zien dat de axiale rekken voor het grootste deel afwijken van de hypothese, de vervorming is weliswaar het kleinste (voor elke hoogte) voor Geen wrijvingsreductie, maar Latex is niet, zoals verwacht, de grootste en Teflon ligt niet dicht bij Geen. Net als in de vorige paragraaf, wordt hierna gekeken naar mogelijke verklaringen voor de gevonden resultaten, te beginnen met de variatie in de LVDT signalen (Figuur 4.82).

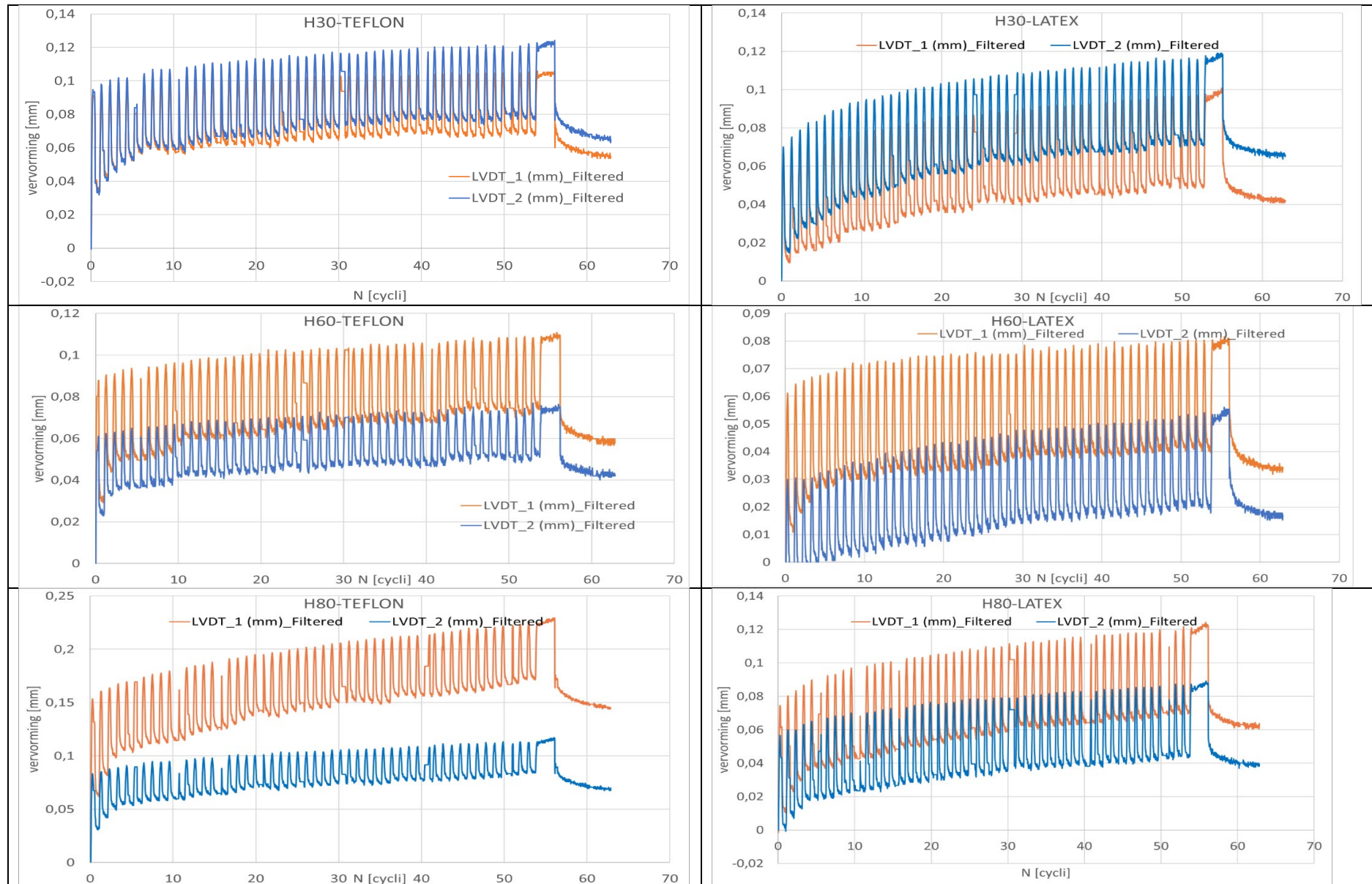
Tabel 4.33: Hypothese en resultaten axiale permanente rek bij N=40 (Tabel 4.26)

AXIALE PERMANENTE REK					
	GEEN	LATEX	TEFLON	PLASTIC	P&T
hypothese	MIN	MAX	~GEEN	~LATEX	~LATEX
H=30	0,19	0,19	0,23	0,23	0,82
H=60	0,06	0,05	0,10	0,18	0,13
H=80	0,08	0,07	0,15	0,21	0,15
H=100	***	***	***	***	***

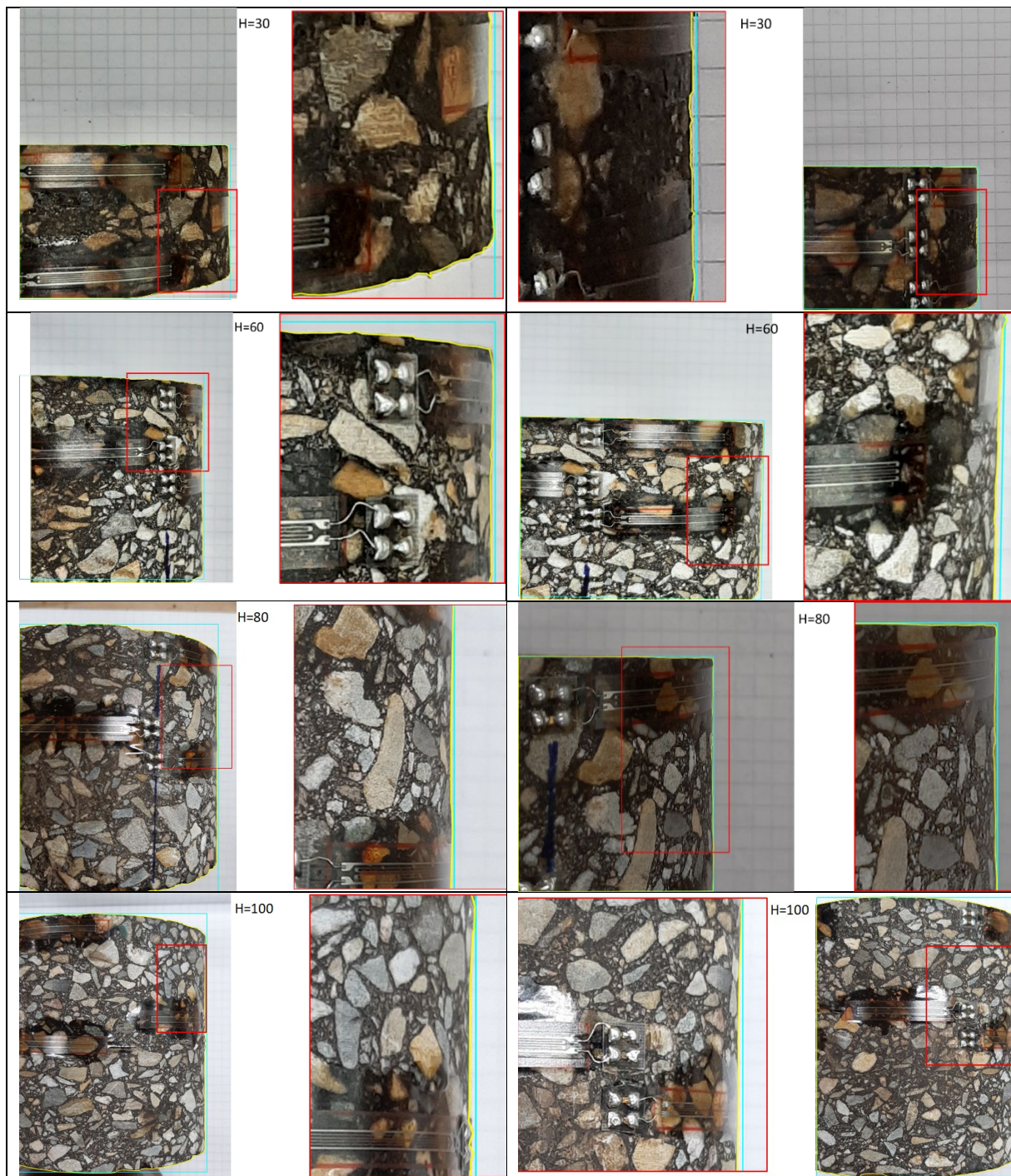
Bij $h=30$ met Latex zien we in bovenstaande figuur een verschil in de plastische vervorming, maar het elastische signaal is vergelijkbaar, bij Teflon is het plastische signaal vergelijkbaar, maar er lijkt een (klein) verschil in het elastische signaal te zitten. Bij $H=60$ mm met Teflon is er verschil tussen zowel de gemiddelde waarde als amplitude van de LVDT signalen. Bij Latex is er ook verschil in de gemiddelde waarde, maar de amplitude van het dynamische signaal is vergelijkbaar in grootte. Voor $H=80$ mm is het beeld vergelijkbaar met $H=60$ mm. Doordat de LVDT signalen bij $H=100$ mm niet geregistreerd zijn, is de vergelijking daarmee niet mogelijk.

De verschillen in de LVDT signalen wijzen erop dat de proefstukken niet gelijkmatig vervormden. Dit kan verschillende oorzaken hebben: scheefstand in de opstelling, een niet plan-parallel proefstuk, verschuiven van het proefstuk tijdens de proef of ongelijkmatige vervorming van het proefstuk.

Het is achteraf lastig na te gaan waar de oorzaak zit, maar de opstelling kan na gemeten worden en de huidige afmetingen van het proefstuk kunnen ook worden gecontroleerd. In Figuur 4.84 zijn close-up gegeven van de kernen in de huidige staat, omdat bij het opmeten bleek dat er lokale vervormingen optreden. Achteraf is dat logisch, de permanente vervorming gebeurt natuurlijk in de mortel, niet in de stenen, dus er ontstaan verschillen in afmetingen over het proefstuk. Hoewel de vervormingen klein zijn in vergelijking met de bezwijkproeven (Figuur 4.78) en dit zeker geen sluitend bewijs vormt, is het wel een nieuwe aanwijzing dat ongelijke vervormingen een rol spelen en mogelijk de resultaten beïnvloeden hebben.



Figuur 4.85: Individuele axiale LVDT signalen voor Teflon (links) en Latex (rechts) voor H=30 mm (boven), 60 mm(midden) en 80 mm(onder)

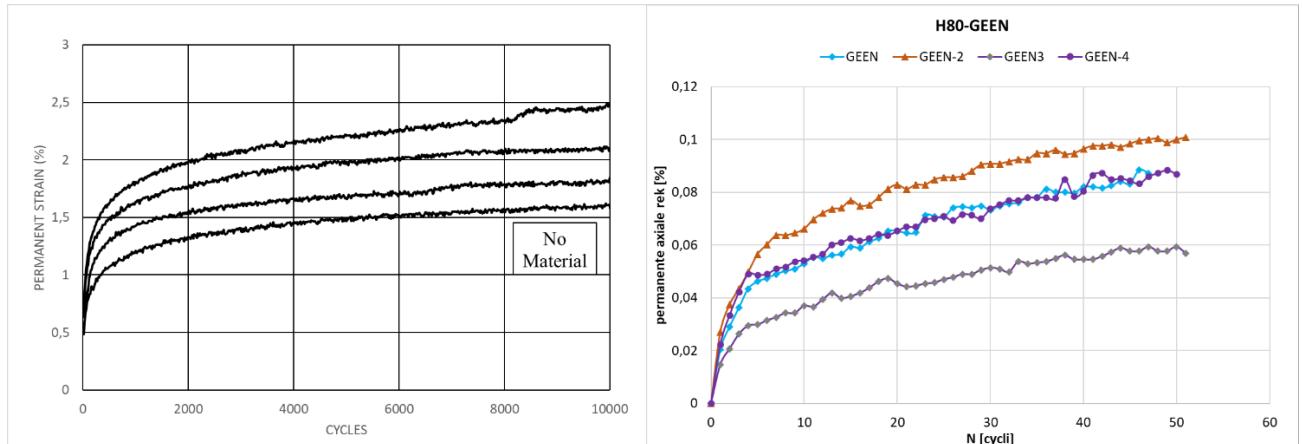


Figuur 4.86: Close-ups van kernen na beproeving, indruk niet-uniforme vervormingen

In 4.6.1.3 is gekeken naar een eventueel effect van volgorde van beproeven op de radiale rekken, maar hoewel er wat effect te zien was, is dit niet zodanig dat het een verklaring geeft voor de gevonden resultaten. In Figuur 4.83 zijn vier proeven zonder wrijvingsreductie links getoond en vier herhalingen uit dit onderzoek zonder wrijvingsreductie rechts. De resultaten zien niet een op een vergelijkbaar, de signalen links komen uit cyclische triaxiaalproeven⁶, een individueel proefstuk voor elke proef en

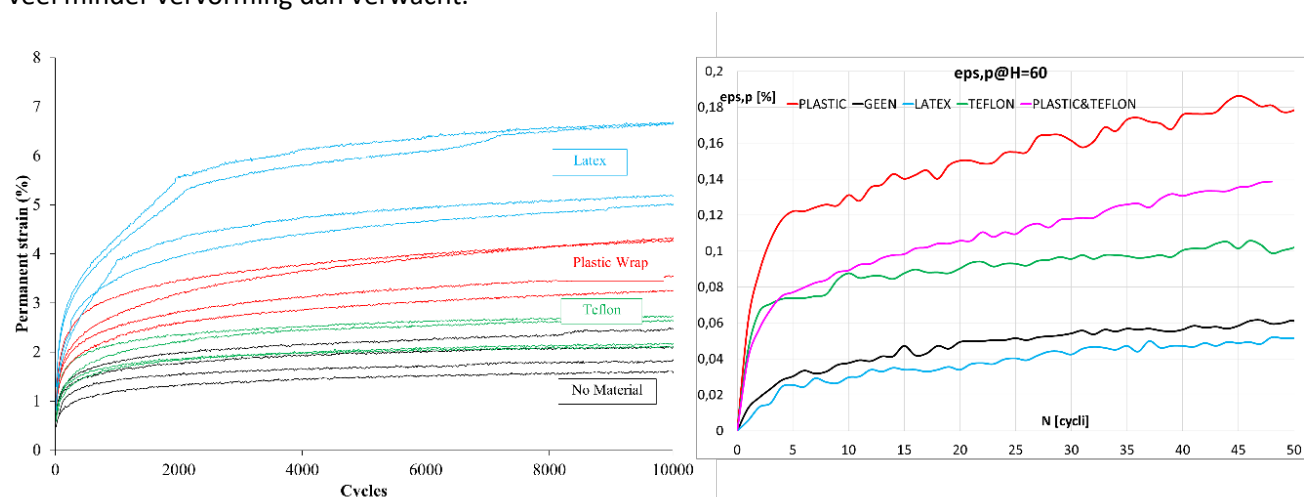
⁶ Voor tussen- en onderlagen, 50 kPa steundruk en 200 kPa amplitude met maximum spanning $2 \times 200 + 50 = 450 \text{ kPa}$

doorgezet tot 10000 herhalingen terwijl in dit onderzoek 50 herhalingen per proef zijn gedaan, met herhaalde metingen op hetzelfde proefstuk en zonder steundruk. Desondanks lijkt de variatie vergelijkbaar te zijn ($1/2,5=0,4$ en $0,04/0,1=0,4$). Ook op de axiale permanente rek lijkt het doen van meerdere metingen op 1 proefstuk dus niet veel invloed te hebben. Dit is ook uit de signalen zelf te halen, aangezien juist G1 (Geen) en G4 over elkaar heen liggen, met G2 erboven en G3 eronder.



Figuur 4.87: Vergelijking herhaalde proeven zonder wrijvingsreductie uit Seleridis ((Seleridis 2017), links) met dit onderzoek (rechts)

Een extra controle op de verwachte axiale vervormingen is gedaan in Figuur 4.84, waar volledige cyclische triaxiaalproeven met vier van de vijf in dit onderzoek gebruikte systemen (links) vergeleken zijn met dit onderzoek (rechts). De resultaten links sluiten voor Geen Wrijvingsreductie, Latex en Plastic ook aan bij eerdere proeven ((Oosterbaan 2001b)). Ook hier is geen een op een vergelijking mogelijk, omdat de spanningsignalen verschillend zijn en omdat in de triaxiaalproef de permanente vervorming maar om de 15 cycli gemeten wordt (dus maar drie meetpunten in de eerste vijftig pulsen), maar zoals te zien is veranderd de ligging ten opzichte van elkaar niet zoveel na het begin. Geen Wrijvingsreductie en Plastic lijken redelijk daar te liggen waar verwacht, Teflon geeft meer en Latex veel minder vervorming dan verwacht.



Figuur 4.88: Axiale blijvende reksignalen voor verschillende systemen vergeleken ((Seleridis 2017), links en dit onderzoek, rechts)

5 Conclusies en Aanbevelingen

5.1 Conclusies

Het onderzoek laat zien dat het effect van wrijvingsreductie op de resultaten voor een drukproef aanzienlijk is. Tegelijkertijd zijn er een aantal verrassende resultaten in de zin dat de radiale rekken niet het verwachte patroon laten zien. Er zijn verschillende controles gedaan op de meetdata en hoewel de variatie in de signalen fors is, blijft de trend gelijk met wat de gemiddelden laten zien. Wat het vreemde resultaat mogelijk verklaart is dat het meten met rekstroken in combinatie met de kromming van de proefstukken dwars op de meetrichting, die complexer is dan verwacht. Hierbij speelt mogelijk ook buiging een rol, omdat de axiale LVDT signalen laten zien dat de vervorming niet gelijkmatig is. Ook de gevonden ongelijkmatige, blijvende vervormingen kunnen hier een rol in spelen.

Ook de axiale metingen wijken, in elk geval voor Latex en Teflon, af van de hypothese. Zeer waarschijnlijk is dat te wijten aan de (te?) korte duur van meten van de axiale permanente rek. De focus lag in het onderzoek ook op de radiale rek.

Doordat de resultaten afwijken van de verwachtingen, is het lastig conclusies trekken. Het onderzoek was bedoeld om eerdere constatering met betrekking tot radiale en axiale vervormingen te verbinden en daarmee tot een advies met betrekking tot de te gebruiken of verder te ontwikkelen wrijvingsreductiemethode te komen. Nu de resultaten op een aantal punten afwijken van eerdere onderzoeken, roept dat de vraag op of dat komt door de gekozen opzet, of dat de variatie zo groot is dat ook dit kan optreden. Vooralsnog is de verwachting dat het eerste het geval is, omdat de eerdere ervaringen uit verschillende onderzoeken komen.

Op grond van dit onderzoek zou Plastic folie de aan te bevelen wrijvingsreductie zijn, maar zowel vanwege de vragen die er nog zijn over dit onderzoek als vanwege het feit dat Latex en Teflon beiden al in normen zijn opgenomen, verdient het aanbeveling om verder te kijken en meer zekerheid te verschaffen.

5.2 Aanbevelingen

De aanbevelingen naar aanleiding van dit onderzoek vallen uiteen in twee groepen: aanbevelingen om de oorzaak van de afwijkende bevindingen vast te stellen en aanbevelingen om een solide basis voor het maken van een keuze in het wrijvingsreductiesysteem te realiseren.

5.2.1 Aanbevelingen ten behoeve van de oorzaak van de afwijkende bevindingen in dit onderzoek

5.2.1.1 Aanvullende proeven met non-contacting, overall metingen

Gezien de vragen die overblijven na dit onderzoek, is het aan te bevelen om een of meerdere series van de proeven, met de al gebruikte proefstukken en rekstroken, bij een groter aantal lastherhalingen te herhalen en daarbij ook een non-contacting meetmethode zoals Digital Image Correlation te gebruiken. Dergelijk metingen maken gebruik van (high speed) camera's en beeldherkenningssoftware om de gehele proefstuk vervorming in kaart te brengen. Het herhalen van een deel van de metingen uit dit onderzoek met toevoeging van een dergelijke techniek maakt het mogelijk om de radiale en axiale vervormingen direct te volgen en mogelijk te verklaren wat er gebeurt ter hoogte van de rekstroken.

Bij het gebruik van DIC zullen de proeven niet zoals gebruikelijk (RAW proef 62) kunnen worden gedaan, maar moet er zonder steundruk en klimaatkast worden gewerkt (uniaxiale proef bij omgevingstemperatuur). Dit vanwege het feit dat het camera systeem niet in de klimaatkast past en (zeer waarschijnlijk) niet door glas kan meten. Door de (gekromde) cel kan zeker niet gemeten worden, nog afgezien van het gebruik van een membraan.

Om uit te sluiten dat de afwijkingen het gevolg zijn van een aanloopeffecten, zou de proef gestart moeten worden met instellingen zoals in een van de proevenseries in dit onderzoek, maar langer door moeten lopen. Daarnaast aan te bevelen om, na(ast) deze herhaling van de hier gebruikte condities voor de vergelijkbaarheid, ook een proef te doen bij een hogere belasting, om een grotere plastische component in de vervorming te hebben en de vergelijking met “echte” triaxiaal resultaten te vereenvoudigen. De voorbereidende proeven zouden op proefstukken zonder rekstroken moeten worden gedaan, als de condities eenmaal gekozen zijn kan de proef op een proefstuk met rekstroken worden gestart met de eerder gebruikte condities en na bijvoorbeeld 1000 herhalingen kan de belasting worden verhoogd tot het verkozen niveau. Dan zijn de overall verplaatsingssignalen, rekstrooksignalen en DIC metingen beschikbaar voor vergelijking.

5.2.1.2 Beoordelen textuur wrijvingsvlak

Aanvullend aan bovenstaande kan direct aan het contactvlak gemeten worden, door de wrijving van de wrijvingsreductiesystemen te meten met een tribometer en de ruwheid met een textuurmeter. Hierbij kan als referentie, asfalt op staal worden genomen. Aandachtspunt daarbij is dat het erop lijkt dat het asfalt de laag waarmee het in contact staat vervormt (plastic en latex) in plaats van er over heen te glijden.

5.2.2 Opbouwen data ten behoeve van keuze systeem

Door deze metingen aan te vullen met reguliere triaxiaalproeven met de gebruikelijke metingen (Figuur 5.1). Indien deze worden uitgevoerd bij verschillende aannemers met strak gespecificeerde wrijvingsreductie systemen (Tabel 5.1) en op centraal geproduceerde proefstukken, zou dit voldoende basis moeten geven voor zowel een keuze voor een wrijvingsreductie systeem als een verklaring voor de verschillen tussen de systemen en de in dit onderzoek gevonden resultaten. Het uitvoeren van reguliere triaxiaalproeven legt hierbij de relatie tussen de detailmetingen in dit onderzoek en het bestaande referentiekader uit ervaringsgegevens en eerdere onderzoeken, voor verschillende wrijvingsreductiesystemen.

4.5 Weerstand tegen permanente vervorming (triaxiaalproef)

De proefstukken voor triaxiaalonderzoek worden verkregen door van gyrotortabletten met een diameter van $100 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ en een hoogte van $80 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$ gelijke delen van de boven- en de onderzijde af te zagen of te polijsten.

Voor asfaltmengsels met $D > 16 \text{ mm}$ moeten triaxiaalproefstukken worden vervaardigd met een diameter van $100 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ en een hoogte van $80 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ (zie NEN-EN 12697-25).

Voor asfaltmengsels met $D \leq 16 \text{ mm}$ moeten triaxiaalproefstukken worden vervaardigd met een diameter van $100 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ en een hoogte van $60 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ (zie NEN-EN 12697-25).

De tijdsduur voor de conditionering van proefstukken op beproevings temperatuur bedraagt ten minste 4 uur en maximaal 24 uur.

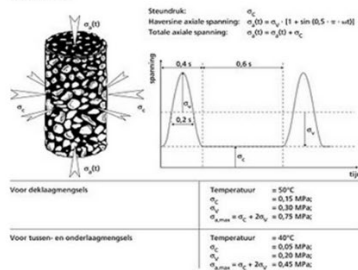
De weerstand tegen permanente vervorming van een asfaltmengsel moet overeenkomstig het bepaalde in NEN-EN 13108-20, bijlage D.7 worden bepaald overeenkomstig beproevingsmethode B (triaxiale cyclische drukproef) van NEN-EN 12697-25 aan de hand van ten minste vier proefstukken.

Het toegepaste belastingssignaal moet, in tegenstelling tot het gestelde in NEN-EN 13108-20 tabel D.2, bestaan uit een haversine met een belastingstijd van $0,4 \text{ s}$ en een rustperiode van $0,6 \text{ s}$ (zie figuur P.62.1).

Asfaltbeton voor deklagen, niet zijnde tijdelijke deklagen, moet worden beproefd bij een temperatuur van $50 \pm 1^\circ \text{C}$. De continu aanwezige opsluitspanning σ_c moet $0,15 \text{ MPa}$ bedragen en de amplitude van de axiale belastingspuls σ_v moet $0,30 \text{ MPa}$ bedragen (zie figuur P.62.1).

Asfaltbeton voor onderlagen of tussenlagen, inclusief tijdelijke deklagen, moet worden beproefd bij een temperatuur van $40 \pm 1^\circ \text{C}$. De continu aanwezige opsluitspanning σ_c moet $0,05 \text{ MPa}$ bedragen en de amplitude van de axiale belastingspuls σ_v moet $0,20 \text{ MPa}$ bedragen (zie figuur P.62.1).

Principeschets:



Figuur P.62.1: Cyclische drukproef op asfalt overeenkomstig NEN-EN 12697-25, deel B

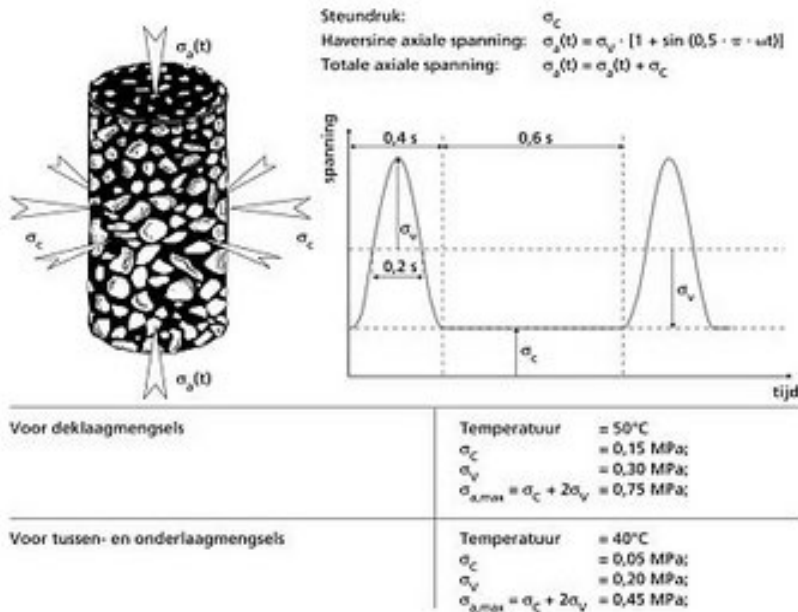
De verticale verplaatsing van het proefstuk moet gemeten worden op de belastingsplaat (zie NEN-EN 12697-25, paragraaf 5.2.1.5) met ten minste twee en bij voorkeur drie opnemers, die door de apparatuur gelijktijdig worden uitgelezen.

De cyclische proeven moeten worden uitgevoerd met wrijvingsreducerende systemen tussen de beide belastingsplaten en het proefstuk. Elk wrijvingsreducerend systeem bestaat uit een set van 2 latexmembranen met een diameter van 100 mm waartussen siliconenvet is aangebracht.

De axiale indrukking van het proefstuk moet gemeten worden vlak voor de axiale belastingspuls wordt opgelegd.

(a) Artikel 4.5 proef 62: Weerstand tegen permanente vervorming (triaxiaalproef)

Principeschets:



(b) Detail 1: Proefcondities

De verticale verplaatsing van het proefstuk moet gemeten worden op de belastingsplaat (zie NEN-EN 12697-25, paragraaf 5.2.1.5) met ten minste twee en bij voorkeur drie opnemers, die door de apparatuur gelijktijdig worden uitgelezen.

De cyclische proeven moeten worden uitgevoerd met wrijvingsreducerende systemen tussen de beide belastingsplaten en het proefstuk. Elk wrijvingsreducerend systeem bestaat uit een set van 2 latexmembranen met een diameter van 100 mm waartussen siliconenvet is aangebracht.

(c) Detail 2&3: Wijze van meten en wrijvingsreductie systeem

Figuur 5.1: Gebruikelijke uitvoering triaxiaalproef (art 4.5 Proef 62, RAW 2020, release sept 2022)

Om nieuwe variaties zoveel mogelijk uit te sluiten is het aan te bevelen om daarbij in de volledige triaxiaalproef bij een of meer deelnemers aan dit onderzoek met 3 (extra) LVDTs die op het proefstuk op of over het membraan bevestigd zijn te meten. Dit heeft als voordeel dat de eventuele initiële vervorming van het wrijvingsreductiesysteem zelf niet wordt meegenomen en er gemeten wordt buiten de grootste invloed van de wrijvingsreductie, terwijl de overall resultaten (meten op bovenplaat met 2 of, bij voorkeur, 3 opnemers, zie Figuur 5.1) vergelijkbaar zijn met die van alle andere deelnemende laboratoria.

Het is hierbij zaak om in elk geval naar 2 systemen te kijken (oude norm (latex) en nieuwe norm (teflon), Figuur 5.2), maar op grond van eerdere resultaten verwachten we het beste resultaat van het systeem met plastic folie. De aanbeveling is daarom om er drie mee te nemen. Daarnaast is het aan te raden elke aannemer deze proeven ook te laten doen met het door hen standaard gebruikte wrijvingsreductiesysteem⁷, daar hebben ze ervaring mee en dat kan dienen als referentie voor henzelf: zijn de resultaten in lijn met wat zij verwachten? Dat maakt dan dus 3 of 4 systemen in totaal (Tabel 5.1).

NEN-EN 12697-25:2005	
5.4.6	To minimize the friction between the loading platens and the test specimen, a membrane-lubricant-membrane-system shall be used between the loading platens and the specimen.
NOTE 1	The membrane may e.g. consist of a disk cut out of typical geotechnical latex rubber membranes, e.g. ELE P/N EL-25-7621 or WFI P/N 11091 or equivalent, of the same diameter as the specimen. A small amount of silicon grease should be applied between both membranes.
NOTE 2	The amount of friction between the loading platens and the specimen is known to have a large impact on the results.
NOTE 3	Instead of putting the test specimen in direct contact to the loading platens, the specimen may be glued by its extremities on steel plates
NEN-EN 12697-25:2016	
8.4.3	To minimize the friction between the upper and lower loading platens and the test specimen, the end faces of the test specimen shall be smooth and plain. Brush the hand over the test specimens' surface. If it feels even without blemishes, it shall be considered adequate, otherwise it shall be polished or ground. A friction reducing system shall be applied.
	The friction-reducing system shall consist of a circular disk cut out of a PTFE-sheet (e.g. Teflon or equivalent). The PTFE-sheet shall have a thickness of 0,5 mm and a shore hardness between D50 and D60. The diameter of the disk shall comply with the diameter of the loading platen.
	Other systems to reduce the friction between loading platen and test specimen surface may be applied if proven that the alternative systems reduces the friction in a similar extend as prescribed system and doesn't influence the axial strain measurement.
NOTE	The amount of friction between the loading platens and the test specimen is known to have a large impact on the results.

Figuur 5.2: Herhaling Figuur 2.1, wrijvingsreductie in de oude en nieuwe EN norm

Tabel 5.1: Details wrijvingsreductie systemen voor opbouw referentie dataset (* gelijkmatig uitgesmeerd over het oppervlak, ** aan te leveren door TU Delft)

1.	latex sheet uit ELE-membraan (d=0,3 mm) - 0,5 gram siliconen vet* - latex sheet (d=0,3 mm)- conform NEN-EN 12697-25B (2005)
2.	Teflon (PTFE) sheet (d=0,5 mm) conform NEN-EN 12697-25B (2016)
3.	Teflon (PTFE) rond plaatje (d=0,5 mm)-1 gram vaseline*- dunne plastic laag vershoudfolie**
4.	Standaard systeem zoals gebruikt per aannemer (inc omschrijving)

⁷ Uit eerder onderzoek (Poot and Erkens 2015) is bekend dat er variatie zit in de wrijvingsreductie systemen, niet alleen vanwege de veranderingen en ruimte in de norm, de RAW omschrijving wijkt ook af van wat er in de oude norm staat (geen dikte)

Daarnaast is het aan te bevelen om twee materialen te nemen (beide AC, een AC bind/base (StAB) en AC surf (DAB) mengsel) om beide standaard condities en het effect van de verschillende wrijvingsreductiesystemen daarbij te bepalen en zo uit te sluiten dat het effect van de systemen afhangt van de testcondities.

Tenslotte moet er een keuze gemaakt worden voor de proefstuk hoogte. Het effect van de verschillen in wrijvingsreductie systemen is groter naarmate het proefstuk lager is, maar doordat de proefstukken in de triaxiaalproef al vrij laag zijn ($h=60\text{mm}$ voor $D \leq 16\text{mm}$ en $h=80\text{mm}$ voor $D > 16\text{mm}$, dat is h/D 0,6 en 0,8, bij en streven naar $h/D \geq 2$, zie paragraaf 2, pagina 7). Indien voor mengsels met $D_{\max}=22\text{mm}$ inderdaad gebruik gemaakt wordt van $h=80\text{mm}$, is het aan te raden voor 80 mm proefstukken te gaan. Indien hier weinig ervaring mee is, is het om variatie te voorkomen verstandiger om voor $h=60\text{mm}$ te gaan. Het is niet aan te bevelen om voor het AC base/bind mengsel een andere hoogte te nemen dan voor het AC surf mengsel, omdat dan de temperatuur- en belastingcondities en de proefstukhoogte door elkaar gaan lopen. Een interessante aanvulling zou wel kunnen zijn om voor een van beide of beide mengsels zowel $h=60\text{mm}$ als $h=80\text{mm}$ te gebruiken. In dat geval is het aan te raden om mengsels met $D_{\max}=16\text{mm}$ te gebruiken omdat daar de overgang tussen de twee hoogtes ligt en omdat daarmee de variatie naar verwachting minder zal zijn.

Tenslotte is het aan te raden de resultaten van dit onderzoek door een en dezelfde partij te laten verzamelen en analyseren.

De analyse van deze resultaten in combinatie met de eerdere onderzoeken en het nadere onderzoek naar de oorzaken voor de onverwachte resultaten in dit onderzoek geeft een solide basis voor het maken van een keuze op het resultaat en begrip van de oorzaak.

6 Referenties

(DWW);, D. W.-e. W., KOAC;, NPC; and Aveco (1995). Standaard uitvoering van de staÉsche kruipproef ter bepaling van de statische kruipeigenschappen van asfaltbeton, Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde.

Antes, P. W., A. F. H. M. Visser and B. Oosterbaan (2001). Responsie van asfalt voor spanningsniveaus onder de eenmalige bewijkspanningen gemeten met triaxiaalapparatuur in laboratorium DWW - meetrapport experimentele fase afstuderen, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Rijkswaterstaat.

Bolk, H. J. N. A. (1980). de kruipproef. SCW (in Dutch).

DWW (1991). de kruipproef. DWW Wijzer. 5.

Erkens, S., D. van Vliet, G. Seleridis, I. van Vilsteren, N. Meinen, A. Alipour, J. Voskuilen and K. Anupam (2018). Comparing lab to field properties in CEN Type Testing for Asphalt Concrete – the NL-LAB program. 7th Transport Research Arena TRA 2018. Viena, Austria.

Erkens, S. M. J. G. (2002a). Asphalt Concrete Response (ACRe) – Determination, Modelling and Prediction, DUP Science, Delft.

Erkens, S. M. J. G. (2002b). Asphalt Concrete Response, Determination, Modelling and Prediction, DUP Science, Delft, the Netherlands.

Erkens, S. M. J. G. and M. R. Poot (1998). The Uniaxial Compression Test - Asphalt Concrete Response (ACRe).

Erkens, S. M. J. G. and M. R. Poot (2000). Additional Compression Tests - Asphalt Concrete Response (ACRe).

Oosterbaan, B. (2001a). Eindrapportage inleidend landelijk vergelijkend onderzoek van de triaxiaalproef, DWW Rijkswaterstaat.

Oosterbaan, B. (2001b). inleidend onderzoek naar de effecten van wrijvingsreductie bij triaxiaalonderzoek.

Poot, M. R. and S. M. J. G. Erkens (2015). Vergelijking van 2 wrijvingsreductie systemen in de triaxiaalproef (NEN 12697-25B) op een asfalt proefstuk inclusief rekstrooksignalen. Delft, TU Delft.

Poot, M. R. and S. M. J. G. Erkens (2016). Vergelijking van 2 wrijvingsreductie systemen in de triaxiaalproef (NEN 12697-25B) op een asfalt proefstuk inclusief rekstrooksignalen. CROW InfraDagen. Papendal, Nederland, CROW.

Seleridis, G. (2017). Evaluation Of The Current Test Methods Of Water Sensitivity And Permanent Deformation. Delft, Delft University of Technology

van Mier, J. G. M. (1997). Fracture Processes of Concrete, CRC Press, Boca Raton, New York, London and Tokyo.

Visser, A. F. H. M. and B. Oosterbaan (2001). Verkennende metingen op asfalt met triaxiaalapparatuur in laboratorium DWW - Voortgangsverslag fase I en III.

Vonk, R. A. (1989). Influence of Boundary Conditions on softening of concrete loaded in compression. Fracture of Concrete and Rock - Recent Developments, Elsevier Applied Science London/New York.

7 Bijlage 1: proefstukgegevens

Tabel 7.1: Afmetingen en dichtheid proefstukken

Proefstuk nummer	Diam [mm]	Hoogte [mm]	Hoogte [mm]	Hoogte [mm]	Hoogte [mm]	Gem. hoogte [mm]	massa [g]	Dichtheid [kg/m ³]
180873(d)	100	31.84	31.77	31.7	31.88	31.8	570.43	2284
180870(w)	100	59.08	59.27	59.08	59.1	59.1	1080.21	2283
180865(v)	100	80	80.23	80.36	79.81	80.1	1440.07	2289
180861(a)	100	99.64	99.46	99.38	99.68	99.5	1796.92	2298