

**MASTER**

**Wrijvingsverliezen bij VZA-strengen**

Venmans, S.A.M.

*Award date:*  
2009

[Link to publication](#)

**Disclaimer**

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

**General rights**

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

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

# Wrijvingsverliezen bij VZA-strengen

*Eindscriptie*

## Afstudeerder

Naam: ing. S.A.M. Venmans

Email: [s.a.m.venmans@student.tue.nl](mailto:s.a.m.venmans@student.tue.nl)

ID-nu: 0564537

## Datum

09 juli 2009

## Versie

1.0

## Afstudeercommissie

prof. dr. ir. D.A. Hordijk

ir. A. de Boer

ing. S.J. de Boer

## Voorwoord

Dit rapport vormt de eindschrijft van het afstudeeronderzoek ter afronding van de studie Bouwkunde aan de Technische Universiteit Eindhoven.

Tijdens mijn studie is er interesse ontstaan voor het gebied van voorgespannen beton. Een vereiste voor mijn afstuderen was dat er in mijn onderzoek zowel theorie als praktijk aan bod zouden komen. Ik ben in contact gekomen met mijn afstudeercommissie en zij hebben vervolgens aangegeven dat er vanuit de Stufib een praktisch onderzoek werd verricht naar wrijvingsverliezen. Dit leek mij een uitgelezen kans om theorie en praktijk beiden aan bod te laten komen in mijn afstudeeronderzoek.

Deze afstudeerscriptie is parallel uitgevoerd aan het werk van de nog te verschijnen rapportage van de Stufib studiecél 8 (Stufib rapport 14; Wrijvingsverliezen in VZA-strengen).

Graag wil ik dit voorwoord gebruiken om nog een aantal mensen te bedanken voor hun inzet en adviezen. Allereerst de afstudeerbegeleiders (Dick Hordijk, Ane de Boer en Siebe de Boer) voor hun uitstekende begeleiding en ondersteuning tijdens de gehele afstudeerperiode. Tevens wil ik de leden van Stufib studiecél 8 (Arno Melssen, Hans van Beurden, Hans Spaan en Sander van Ameijde) bedanken voor hun bijdrage aan dit onderzoek. Tot slot wil ik de medewerkers van het Pieter van Musschenbroek laboratorium, Andrew Zieliski en Jan Venmans bedanken voor hun inzet, adviezen en commentaar.

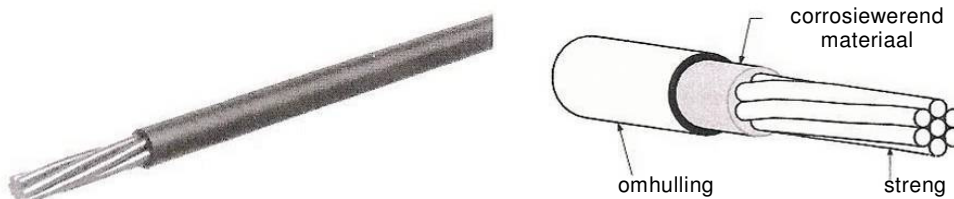
Tilburg, 9 juli 2009

Stijn Venmans

## Samenvatting

In de utiliteitsbouw (strokenvloeren) en industriebouw (tankconstructies) worden al decennia lang voorspanstrengen zonder aanhechting toegepast voor het versterken van het beton. Door toepassing van voorspanning kan een aantal voordelen worden behaald. Er kunnen slankere en grotere overspanningen worden ontworpen en het eigen gewicht van de constructie kan worden verminderd.

De voorspanstrengen zijn opgebouwd uit een drietal onderdelen, te weten de voorspanstreng, een corrosiewerend materiaal (meestal vet of was) en een omhulling. Een voorbeeld is weergegeven in figuur 0.1.1.



Figuur 0.1.1 Opbouw VZA-streng

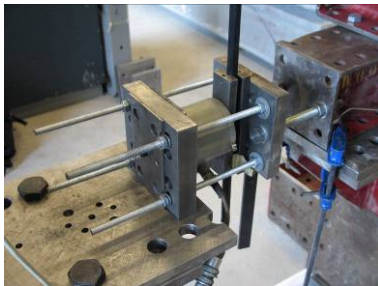
Tijdens het voorspannen van een voorspanstreng ontstaat wrijving in het spankanaal. Deze wrijving kan met behulp van de NEN 6720 (Voorschriften Beton) eenvoudig worden uitgerekend. In de praktijk blijkt dat de vooraf berekende verliezen ten gevolge van wrijving in het spankanaal vele malen hoger te zijn dan dat er in de praktijk wordt gemeten. Hierbij zijn vraagtekens ontstaan vanuit de praktijk waarom dit verschil ontstaat en hoe de theoretische benadering van de wrijving beter aangesloten kan worden met de gemeten wrijving.

De eerste signalen vanuit de praktijk, die erop duiden dat er een verschil was tussen de berekende en gemeten gemiddelde voorspankracht, dateren van een aantal jaar geleden. De signalen kunnen als volgt worden omschreven:

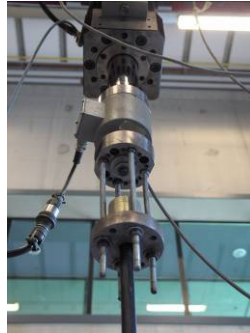
1. Bij lange voorspanstrengen wordt aan twee zijden gespannen. Tijdens het spannen aan de tweede zijde blijkt vaak dat de aanwezige voorspankracht hoger is dan berekend. Hierdoor is het niet mogelijk aan de tweede zijde nog extra voorspankracht aan te brengen.
2. Tijdens het aanbrengen van de voorspankracht wordt de verlenging gebruikt als controlemiddel om vast te stellen of de berekende voorspankracht daadwerkelijk is aangebracht. In de praktijk blijkt dat de vooraf berekende verlenging kleiner is dan de gemeten verlenging.

Deze signalen hebben aanleiding gegeven om een onderzoek op te starten naar de oorzaken van de verschillen tussen gemeten en berekende voorspankrachten.

In het laboratoriumonderzoek is onderzocht of en waardoor de huidige aangehouden wrijvingscoëfficiënt van de voorspanstreng afwijkt ten opzichte van de gemeten wrijvingscoëfficiënt. Er zijn verschillende parameters onderzocht om vast te stellen of deze daadwerkelijk van invloed zijn op de getalswaarde van de wrijvingscoëfficiënt. De onderzochte parameters zijn: ruwheid van de omhulling, diameter voorspanstreng, spansnelheid, aangebrachte normaalkracht en rotatievrijheid van het spanvijzel. In totaal zijn er 22 metingen uitgevoerd. Enkele details van de proefopstelling zijn te zien in figuur 0.2 en figuur 0.3.



Figuur 0.2 Detail 1 proefopstelling



Figuur 0.3 Detail 2 proefopstelling

Uit het experimentele onderzoek in het laboratorium is gebleken dat de aangehouden wrijvingscoëfficiënt in de NEN vele malen hoger is dan de gemeten wrijvingscoëfficiënt. Verder is vastgesteld dat de onderzochte parameters een minimale invloed hebben op de resultaten.

Bij het experimentele onderzoek in de praktijk zijn 29 metingen bij vloerconstructies en 34 metingen bij tankconstructies uitgevoerd. Bij deze metingen zijn wederom verschillende parameters onderzocht: lengte voorspanstreng, diameter voorspanstreng, som van doorlopen hoek en ruwheid van omhulling. Uit de praktijkmetingen is gebleken dat de lengte, diameter en som van doorlopen hoek een invloed hebben op de uiteindelijke resultaten. In figuur 0.4 is de proefopstelling te zien van de praktijkmeting. Een drukdoos is voor de spanvijzel geplaatst om zodanig de voorspankrachten te kunnen meten.



Figuur 0.4 Proefopstelling praktijkmetingen

De resultaten van zowel de laboratoriummetingen als de praktijkmetingen hebben aangetoond dat de huidige rekenwijze voor de bepaling van de wrijving volgens NEN 6720 een overschatting is van de optredende wrijving. Om hier meer inzicht in te krijgen, is onderzocht hoe de huidige formule en bijbehorende vaste waarden (wrijvingscoëfficiënt en Wobble-effect) tot stand is gekomen. De vaste waarden zijn proefondervindelijk bepaald, maar hier is geen specifiek onderzoek naar verricht.

Tijdens het analytische onderzoek is een model opgesteld dat gebaseerd is op het huidige model uit de norm. De laboratoriummetingen en praktijkmetingen zijn de input geweest voor het opgestelde model. Door een verfijning van het model te modelleren, zijn meer invloedsfactoren mee te nemen in de berekening en sluit de berekende wrijving ook beter aan op de gemeten wrijving.

De belangrijkste conclusie die uit dit onderzoek naar voren is gekomen, is dat de huidige rekenmethode een goede uitgangssituatie blijft om de wrijving bij voorspanstrengen zonder aanhechting te kunnen bepalen, mits een andere waarde voor de wrijvingscoëfficiënt wordt aangehouden. Door de wijziging van de wrijvingscoëfficiënt is de vooraf berekende en de achteraf gemeten wrijving beter op elkaar afgestemd.

# Inhoud

<b>VOORWOORD</b> .....	<b>1</b>
<b>SAMENVATTING</b> .....	<b>2</b>
<b>1. INLEIDING</b> .....	<b>6</b>
<b>2. BEGRIPPEN</b> .....	<b>8</b>
2.1. <i>Voorspanning</i> .....	8
2.1.1. Voor- en nadelen .....	8
2.2. <i>Voorspansystemen</i> .....	9
2.2.1. Voorspanstaaf.....	9
2.2.2. Voorspandraad .....	9
2.2.3. Voorspanstreng.....	10
2.3. <i>Voorspantechnieken</i> .....	10
2.3.1. Voorgerekte voorspannen .....	10
2.3.2. Nagerekte voorspannen met aanhechting (VMA) .....	11
2.3.3. Nagerekte voorspannen zonder aanhechting (VZA) .....	12
<b>3. RELEVANTIE</b> .....	<b>13</b>
3.1. <i>Inleiding</i> .....	13
3.2. <i>Signalen praktijk</i> .....	13
3.3. <i>Beoordelen belangen</i> .....	14
3.3.1. Constructief belang .....	15
3.3.2. Economisch belang.....	18
3.3.3. Uitvoeringstechnisch belang .....	19
3.3.4. Veiligheidsbelang.....	19
3.4. <i>Conclusie belangen</i> .....	20
<b>4. LITERATUUR</b> .....	<b>21</b>
4.1. <i>Geschiedenis</i> .....	21
4.1.1. Voorspanning algemeen.....	21
4.1.2. Voorspanning zonder aanhechting.....	21
4.2. <i>Principe</i> .....	22
4.3. <i>Verschillen mechanisme VMA – VZA</i> .....	24
4.3.1. Mechanisme .....	24
4.3.2. Voor- en nadelen VZA.....	25
4.4. <i>Toepassingsgebieden</i> .....	25
4.4.1. Tankconstructies.....	26
4.4.2. Vloerconstructies .....	28
4.5. <i>Wrijving bij voorspanning</i> .....	30
4.5.1. Inleiding.....	30
4.5.2. Bestaande modelvorming .....	32
4.5.3. Normering.....	36
4.5.4. Fabrikanten.....	38
4.6. <i>Conclusie literatuur</i> .....	39
<b>5. WRIJVINGSCOËFFICIËNT</b> .....	<b>40</b>
5.1. <i>Inleiding</i> .....	40
5.2. <i>Meetmethoden</i> .....	40
5.2.1. Algemene meetmethoden.....	40
5.2.2. Meetmethode fabrikant.....	42
<b>6. METINGEN LABORATORIUM</b> .....	<b>43</b>
6.1. <i>Algemene informatie</i> .....	43

6.2.	<i>Proefopstelling</i> .....	44
6.2.1.	Correctie proefopstelling .....	47
6.3.	<i>Resultaten</i> .....	51
6.3.1.	Eigenschappen voorspanstreng.....	51
6.3.2.	Diameter.....	52
6.3.3.	Verplaatsingssnelheid .....	53
6.3.4.	Normaalkracht .....	54
6.3.5.	Rotatievrijheid.....	55
6.4.	<i>Wrijvingscoëfficiënt</i> .....	56
6.5.	<i>Conclusie wrijvingsmetingen</i> .....	57
<b>7.</b>	<b>METINGEN PRAKTIJK</b> .....	<b>58</b>
7.1.	<i>Inleiding</i> .....	58
7.2.	<i>Projectomschrijving</i> .....	58
7.2.1.	Kavel 13, Amsterdam .....	58
7.2.2.	Riekerpolder, Amsterdam.....	58
7.2.3.	Windesheim, Zwolle .....	59
7.3.	<i>Bepaling doorlopen hoek</i> .....	60
7.4.	<i>Invloed diameter</i> .....	61
7.4.1.	Inleiding.....	61
7.4.2.	Resultaten .....	61
7.4.3.	Analyse .....	62
7.5.	<i>Invloed lengte en kabelverloop</i> .....	63
7.5.1.	Inleiding.....	63
7.5.2.	Resultaten .....	64
7.5.3.	Analyse .....	65
7.6.	<i>Invloed fabrikant</i> .....	72
7.6.1.	Inleiding.....	72
7.6.2.	Resultaten .....	72
7.6.3.	Analyse .....	72
7.7.	<i>Conclusie</i> .....	77
7.8.	<i>Verlenging</i> .....	77
7.8.1.	Inleiding.....	77
7.8.2.	Resultaten .....	77
7.8.3.	Beschouwing verlenging.....	79
7.8.4.	Conclusie.....	82
<b>8.</b>	<b>DISCUSSIE</b> .....	<b>83</b>
8.1.	<i>Inleiding</i> .....	83
8.2.	<i>Basisformule</i> .....	83
8.3.	<i>Modelvorming</i> .....	84
8.3.1.	Recht kabelverloop .....	84
8.3.2.	Gekromd kabelverloop .....	90
8.4.	<i>Aanpassing huidig rekenmodel</i> .....	92
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</b> .....	<b>94</b>
9.1.	<i>Conclusies</i> .....	94
9.2.	<i>Aanbevelingen</i> .....	95
	<b>BRONVERMELDING</b> .....	<b>96</b>





# 1. Inleiding

Sinds enige jaren bestaat er vanuit de praktijk de vraag hoe het komt dat de verliezen van de VZA-voorspanstrengen, ten gevolge van wrijving in de spankanalen, bij de uitvoering lager zijn dan vooraf is berekend.

Om meer duidelijkheid te krijgen over hoe en waarom dit verschil ontstaat, is vanuit de studievereniging Stufib een studiecel samengesteld om hier een onderzoek naar te verrichten.

Dit onderzoek richt zich op een betere afstemming tussen theoretisch berekende wrijving en praktisch gemeten wrijving. Dit kan wellicht worden bereikt door een wijziging van de vaste waarden (wrijvingscoëfficiënt en Wobble-effect) in de huidige rekenmethode van de Nederlandse norm of door het opstellen van een andere rekenmethode voor de bepaling van de wrijvingsverliezen.

Parallel aan het onderzoek van de Stufib is een onderzoek opgestart bij de Technische Universiteit in Eindhoven. Bij dit onderzoek zijn naast metingen in de praktijk, ook de achtergronden van de rekenregels onderzocht en laboratoriumproeven naar de bepaling van de wrijvingscoëfficiënt uitgevoerd.

De probleemstelling van het uiteindelijke onderzoek naar wrijvingsverliezen bij VZA-voorspanstrengen is als volgt geformuleerd:

“De wrijvingsverliezen bij VZA-voorspanstrengen, zoals deze volgens de huidige rekenregels in de Nederlandse norm worden gehanteerd, wijken af ten opzichte van de in de praktijk gemeten wrijvingsverliezen.”

De doelstelling van het uiteindelijke onderzoek naar wrijvingsverliezen bij VZA-voorspanstrengen is als volgt geformuleerd:

“Door het uitvoeren van een analytisch en experimenteel onderzoek meer kennis verkrijgen over het onderwerp wrijvingsverliezen bij VZA-voorspanstrengen met als uiteindelijk doel het geven van een verbetering voor de rekenmethode van de wrijvingsverliezen.”

Het belang van onderzoek is vierledig:

01. Constructief: Een beter inzicht krijgen in de spanningen in het beton en voorspanstaal. Hierdoor kan nauwkeuriger het gedrag van de constructie worden bepaald.
02. Economisch: Er kan mogelijk een voordeel behaald worden in materiaalkosten en arbeidsuren, doordat er minder voorspanstrengen of ankervoorzieningen noodzakelijk zijn.
03. Uitvoeringstechnisch: afwijkingen gevonden tussen berekende en gemeten voorspankrachten moeten altijd gecontroleerd worden en zorgen voor extra werkzaamheden voor de uitvoering en de constructeur. Betere benadering van de wrijvingsverliezen kan tijdsbesparend zijn.
04. Veiligheid: bij het tweezijdig spannen bestaat de kans dat bij het vastwippen aan één spanzijde de wippen twee keer op dezelfde plaats aangrijpen. Hierdoor ontstaat een extra verzwakking van het voorspanstaal. Bij een betere benadering van de verliezen, is de kans van twee keer vastwippen op dezelfde plaats veel kleiner.

In hoofdstuk 2 zijn de belangrijkste begrippen nader uitgelegd.

In hoofdstuk 3 is uitgelegd wat het belang van het onderzoek is. Er is nagegaan welke signalen vanuit de praktijk doorslag hebben gegeven voor het opzetten van het onderzoek en de belangen zijn beoordeeld.

In hoofdstuk 4 is de literatuur omschreven. Er is een uitleg gegeven over de geschiedenis van de voorspanning, het principe en de verschijningsvormen van voorspanning en wat wrijving bij voorspanning precies voor invloed heeft.

In hoofdstuk 5 is een uitleg gegeven over de wrijvingscoëfficiënt. In hoofdstuk 6 zijn de laboratoriummetingen uitgewerkt. De randvoorwaarden en meetmethode zijn omschreven, resultaten zijn uiteengezet en tot slot is een conclusie getrokken.

In hoofdstuk 7 zijn de praktijkmetingen onderzocht. De resultaten zijn uitgesplitst in voorspanstrengen met een recht kabelverloop en voorspanstrengen met een gekromd kabelverloop.

Hoofdstuk 8 is gebruikt om een model te formuleren naar aanleiding van de gevonden literatuur, de laboratoriummetingen en de praktijkmetingen.

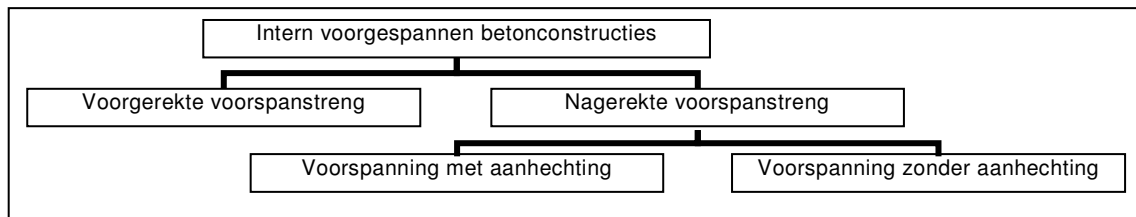
Tot slot worden in hoofdstuk 9 de conclusies getrokken en aanbevelingen gegeven, op basis van wat in de voorafgaande hoofdstukken is besproken.

## 2. Begrippen

### 2.1. Voorspanning

Voorspannen bij constructies is het aanbrengen van een drukspanning in het beton op de plaats waar trekspanningen niet toelaatbare waarden aannemen.

Voorspanning kan grofweg opgedeeld worden in twee categorieën. In figuur 2.1 is de opsplitsing van de verschillende (interne) voorspannsystemen neergezet.



Figuur 2.1 Opsplitsing voorspannsystemen

Er bestaan constructies met voorgerekte voorspanstrengen en constructies met nagerekte voorspanstrengen. Voorgerekte voorspanstrengen worden voor het storten van het beton al op spanning gebracht. Nagerekte voorspanstrengen worden na gedeeltelijke of volledige uitharding van het beton op spanning gebracht.

Bij gedeeltelijke uitharding kan slechts een deel van de uiteindelijke voorspankracht op het beton worden aangebracht (bijv. spanning nodig voor ontkisten). Als het beton volledig is uitgehard kan de uiteindelijke voorspankracht worden aangebracht.

De nagerekte voorspanstrengen kunnen worden opgesplitst in voorspanning met aanhechting en voorspanning zonder aanhechting. Bij voorspanning met aanhechting is er een aanhechting tussen betonconstructie en voorspanstreng. Bij voorspanning zonder aanhechting is er geen aanhechting tussen de betonconstructie en de voorspanstreng.

#### 2.1.1. Voor- en nadelen

Bij toepassing van voorspanning zijn er een aantal voordelen te benoemen ten opzichte van niet voorgespannen constructies:

- Grotere en slankere overspanningen mogelijk;
- Eigen gewicht wordt verminderd door ontwerp slankere constructies. Dit heeft een gunstig effect op het dimensioneren van fundering en draagconstructie;
- Vermindering eigen gewicht heeft positieve bijdrage aan prefabricage, grotere elementen zijn vanwege gewichtsbesparing vooraf geconditioneerd te vervaardigen en daarna te vervoeren;
- Door geringere constructiehoogte kan de totale hoogte van een gebouw worden verminderd of het aantal verdiepingen bij een vaste hoogte worden vergroot;
- Bij bouwen onder de grond heeft de constructiehoogte ook een voordeel, doordat er minder diep ontgraven hoeft te worden;
- Bij gelijke constructiehoogte grotere (veranderlijke) belasting opneembaar;
- Bouwtijdverkorting door sneller ontkisten;
- Hoge weerstand tegen pons mogelijk;

- Ontbreken of sterk beperken van scheurvorming, voordeel voor waterdichtheid en weerstand tegen corrosie (reden voor toepassing bij offshore).

Naast de voordelen zijn er ook een aantal nadelen bij het toepassen van voorspanning:

- De detaillering, van met name het ankergebied, moet goed zijn ontworpen vanwege inleiding grote krachten;
- Voorspanstaal is zeer gevoelig voor corrosie, waarbij speciale aandacht voor bescherming noodzakelijk is;
- Voorspanning is duurder (hogere materiaalkosten en arbeidsintensief) dan normaal betonstaalwapening.

## 2.2. Voorspansystemen

### 2.2.1. Voorspanstaaf

NEN 3868: 'Een voorspanstaaf is een warmgewalste gladde of geprofileerde stalen staaf die door verdere behandeling en/of bewerking de gewenste toepassingsmogelijkheden verkrijgt.'

Een voorspanstaaf heeft een standaarddiameter van 15 mm tot 36 mm en een staalsoort tussen FeP 1030 en FeP 1230.

In figuur 2.2 is een voorbeeld van een gladde en geribde voorspanstaaf te zien.



Figuur 2.2 Gladde voorspanstaaf (a), Geribde voorspanstaaf (b)

Een voorspanstaaf is niet goed beschermd tegen externe invloeden (weersinvloeden of agressief milieu) en moet daarom altijd worden beschermd (meest gebruikte bescherming is beton).

### 2.2.2. Voorspandraad

NEN 3868: 'Een voorspandraad is een draad dat wordt verkregen door het koudtrekken van walsdraad dat vervolgens, na eventueel profileren, een thermische nabehandeling ondergaat onder gelijktijdige plastische vervorming.'

Een voorspandraad heeft een standaarddiameter van 3 mm tot 12 mm en een staalsoort die varieert van FeP 1560 tot FeP 1960. De draad wordt vaak toegepast in een draadbundel.

In figuur 2.3 is een anker met voerspandraaden weergegeven.



Figuur 2.3 Ankervoorziening met voerspandraaden

Een voorspandraad is niet goed beschermd tegen externe invloeden (weersinvloeden of agressief milieu) en moet daarom altijd worden beschermd (meest gebruikte bescherming is beton).

### 2.2.3. Voorspanstreng

NEN 3868: 'Een voorspanstreng is een streng die wordt verkregen door het samenslaan van koudgetrokken walsdraad en die vervolgens een thermische nabehandeling ondergaat onder gelijktijdige plastische vervorming.'

Een voorspanstreng bestaat uit drie of zeven losse draden die om elkaar heen zijn getordeerd. De diameter van de voorspanstreng varieert van 6,9 mm tot 15,7 mm (afhankelijk van de diameter van de afzonderlijke draden) en de staalsoort varieert tussen FeP 1860 en FeP 2060 (FeP 1860 is de gebruikelijke staalsoort).

In figuur 2.4 is een voorbeeld weergegeven van een 7-draads voorspanstreng.



*Figuur 2.4 7-draads voorspanstreng*

Een voorspanstreng is niet goed beschermd tegen externe invloeden (weersinvloeden of agressief milieu) en moet daarom altijd worden beschermd (meest gebruikte bescherming is beton of een corrosiewerend materiaal zoals vet of was).

## 2.3. Voorspantechnieken

### 2.3.1. Voorgerekt voorspannen

De voorspantechniek met voorgerekte voorspanstrengen wordt voornamelijk toegepast bij het fabrieksmatig vervaardigen van betonelementen, zoals bijvoorbeeld heipalen en vloerplaten. Er wordt voornamelijk gewerkt met gestandaardiseerde elementen.

In figuur 2.5 zijn kanaalplaten weergegeven, waarbij een voorgerekte voorspanstreng is aangebracht (aan de onderzijde van het element).



*Figuur 2.5 Voorbeeld kanaalplaatvloer*

De manier van uitvoeren verloopt volgens de volgende werkmethode:

- de voorspanstrengen worden in een voorspanbaan (bekistingssysteem) aan beide uiteinden op spanning gebracht;
- over de gehele lengte van de voorspanbaan wordt, al dan niet continu, beton gestort;
- na verharding van het beton wordt de aangebrachte spanning op de uiteinden van de voorspanstrengen verwijderd;
- de uitgeharde betonelementen staan nu onder spanning en kunnen waar nodig op lengte worden afgezaagd;
- elementen zijn nu klaar voor vervoer naar bouwplaats.

### 2.3.2. Nagerekt voorspannen met aanhechting (VMA)

Bij nagerekt voorspannen wordt de voorspanning pas na storten en uitharding van het beton op spanning gebracht. Nagerekt voorspannen met aanhechting wordt voornamelijk toegepast bij grotere constructies, zoals civiele kunstwerken waar grote momenten ten gevolge van grote belastingen op kunnen treden.

Voorafgaand aan het storten van beton worden voorspankanalen geplaatst (meestal stalen omhullingsbuizen) die zorgen voor een uitsparing in het beton. Tevens worden de voorspanstrengen aangebracht, zodat de omhullingsbuizen niet gaan opdrijven tijdens het storten.

Als het beton in de constructie voldoende druksterkte heeft ontwikkeld, kan de voorspanning worden aangebracht. Tot slot wordt de holle ruimte tussen de voorspankanalen en de voorspanstrengen geïnjecteerd met grout.

De aanhechting van voorspanstreng en beton wordt verkregen door het injecteren van de voorspankanalen.

In figuur 2.6 is een constructie in aanbouw te zien, waarbij gekromde omhullingsbuizen duidelijk zichtbaar zijn.



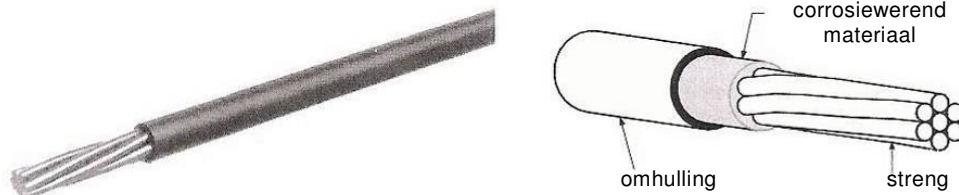
Figuur 2.6 Nagerekte voorgespanssen constructie in uitvoering

### 2.3.3. Nagerekt voorspannen zonder aanhechting (VZA)

Ook bij nagerekt voorspannen zonder aanhechting wordt de voorspanning pas na storten en uitharden van het beton op spanning gebracht.

Een VZA-streng is een samengestelde kabel opgebouwd uit drie delen (zie figuur 2.7):

1. Voorspanstreng;
2. Duurzaam corrosiewerend vet of was;
3. HDPE-omhulling.

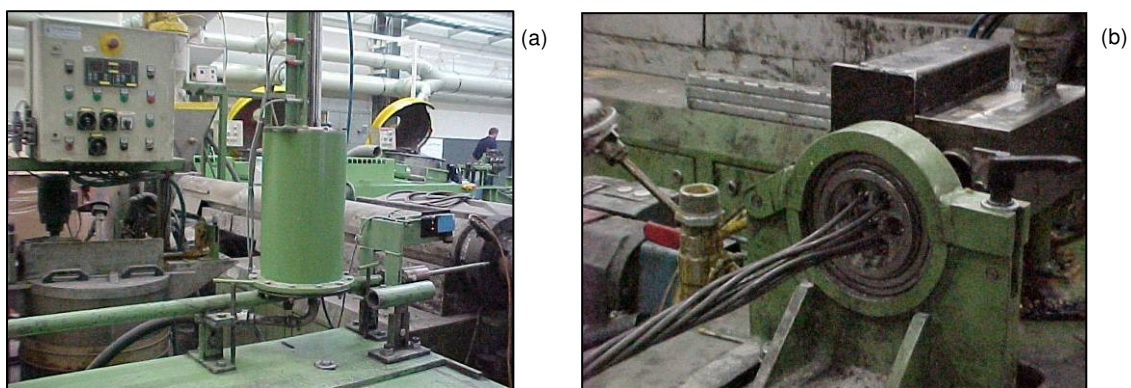


Figuur 2.7 Opbouw VZA-streng

Een voorspanstreng is niet goed beschermd tegen externe invloeden (zoals weersinvloeden of agressief milieu). Bij voorgerekte voorspanstrengen en nagerekte voorspanning met aanhechting is er direct contact tussen het beton en het staal en zorgt het alkalische milieu van het beton voor een goede bescherming van het staal tegen corrosie (roesten).

Bij nagerekt voorspannen zonder aanhechting bestaat er geen bescherming van het beton tegen externe invloeden. Daarom wordt de voorspanstreng voorzien van een corrosiewerend materiaal (vet of was).

In figuur 2.8 zijn het aanbrengen van het vet en de was, zoals deze in de fabriek wordt aangebracht, weergegeven.



Figuur 2.8 Aanbrengen vet (a), Aanbrengen was (b)

Om de streng en het corrosiewerende materiaal bij elkaar te houden en om extra bescherming te bieden, bestaat de buitenwand uit een HDPE-omhulling. Deze omhulling wordt met behulp van het extrusieproces om de streng heen gefabriceerd.

### 3. Relevantie

#### 3.1. Inleiding

Om te bepalen of het onderzoek voldoende relevantie heeft, is eerst onderzocht welke belangen allemaal een rol spelen bij een betere bepaling van de wrijvingsverliezen bij de voorspanstrengen zonder aanhechting.

Alvorens de relevantie te onderzoeken, zijn eerst de signalen vanuit de praktijk naast elkaar gezet. Hieruit is vervolgens opgemaakt dat het onderzoek noodzakelijk is.

#### 3.2. Signalen praktijk

De eerste signalen vanuit de praktijk, die erop duiden dat er een verschil was tussen de berekende en gemeten gemiddelde voorspankracht, dateren van een aantal jaar geleden [18].

De signalen zijn als volgt te omschrijven:

1. Bij lange voorspanstrengen wordt aan twee zijden gespannen. Tijdens het spannen aan de tweede zijde blijkt vaak dat de aanwezige voorspankracht hoger is dan berekend. Hierdoor is het niet mogelijk aan de tweede zijde nog extra voorspankracht aan te brengen. Mogelijke oorzaak is dat het optredende wrijvingsverlies lager is dan de berekende wrijvingsverlies. Daarmee is de voorspankracht groter over de gehele voorspanstreng.
2. Tijdens het aanbrengen van de voorspankracht wordt de verlenging gebruikt als controlemiddel om vast te stellen of de berekende voorspankracht daadwerkelijk is aangebracht. In de praktijk blijkt dat de vooraf berekende verlenging kleiner is dan de gemeten verlenging. Als mogelijke oorzaak voor het verschil tussen berekende en gemeten verlenging wordt aangegeven dat de berekende wrijvingsverliezen te hoog zijn ingeschat. Hierdoor is de aangebrachte voorspankracht groter en wordt de verlenging daarmee ook groter.

Studievereniging Stufib heeft besloten een studiecél samen te stellen, die moest vaststellen hoe het wrijvingsverlies bij VZA-voorspanstrengen nu eigenlijk berekend moest worden.

De studiecél heeft een aantal metingen uitgevoerd om te bepalen of de signalen inderdaad correct waren. Er zijn metingen uitgevoerd bij prefab tankconstructies en vloerconstructies. Er zijn metingen verricht naar de verlengingen en de voorspankracht aan de niet-spanzijde. De resultaten van de metingen zijn terug te vinden in tabel 3-1.

Tabel 3-1 *Praktijkmetingen Stufib Studiecél #8*

Constructie	Kabelverloop	Lengte voorspanstreng	Wrijvingsverlies		Voorspankracht	Afwijking
			Theoretisch	Gemeten		
Tankconstructie	gekromd	87.8 meter	38 kN	18 kN	208 kN	9.6 %
Tankconstructie	gekromd	44.4 meter	21 kN	21 kN	208 kN	0.0 %
Vloerconstructie	recht	82.4 meter	37 kN	25 kN	152 kN	7.9 %
Vloerconstructie	gekromd	82.4 meter	87 kN	31 kN	152 kN	36.8 %
Vloerconstructie	gekromd	66.4 meter	56 kN	20 kN	207 kN	17.6 %
Vloerconstructie	recht	49.7 meter	23 kN	11 kN	147 kN	8.2 %
Vloerconstructie	gekromd	49.7 meter	46 kN	22 kN	147 kN	16.3 %



De metingen van de studiecél tonen aan dat er een afwijking bestaat tussen berekening en praktijkmeting. De weergegeven afwijking is ten opzichte van de aangebrachte voorspankracht. Bij de voorspanstrengen met een recht kabelverloop ligt de afwijking tussen theorie en praktijk rond de 8 %. De afwijkingen tussen theorie en praktijk loopt bij de voorspanstrengen met een gekromd kabelverloop uiteen van 0.0 % tot 36.8 %.

### 3.3. Beoordelen belangen

De relevantie van het onderzoek bestaat uit vier delen:

01. Constructief;
02. Economisch;
03. Uitvoeringstechnisch;
04. Veiligheid.

#### 01. Constructief

Het constructieve belang van het onderzoek richt zich voornamelijk op een betere benadering van de spanningen in het beton en de voorspanstreng.

Door een vermindering van het wrijvingsverlies en daarmee een grotere gemiddelde voorspankracht, ontstaat een ander spanningsverloop. Door het verschil in spanningsverloop bestaat de kans dat bij een bepaalde grenstoestand de maximaal toelaatbare spanning overschreden wordt.

#### 02. Economisch

Het economische belang van het onderzoek is kostenbesparend in arbeidsuren en in materiaalkosten.

Bij een betere benadering van de wrijvingsverliezen kan wellicht worden volstaan met minder voorspanstrengen in de constructie. Daarnaast bestaat bij lange elementen wellicht de mogelijkheid om slechts van één zijde te spannen, waar nu nog via twee zijden wordt gespannen. Hiermee zijn minder spanvoorzieningen en handelingen noodzakelijk.

#### 03. Uitvoeringstechnisch

Het belang voor de uitvoering ligt voornamelijk bij het wegnemen van discussies tijdens de controle van de aangebrachte gemiddelde voorspankracht.

Door constante afwijking tussen berekende en gemeten verlenging ontstaan veelvuldig discussies of de juiste voorspankracht wel is bereikt. Bij een betere benadering van de voorspankracht zal de afwijking tussen berekende en aangebrachte voorspankracht binnen de vastgestelde marges vallen en ontstaan er geen discussies meer.

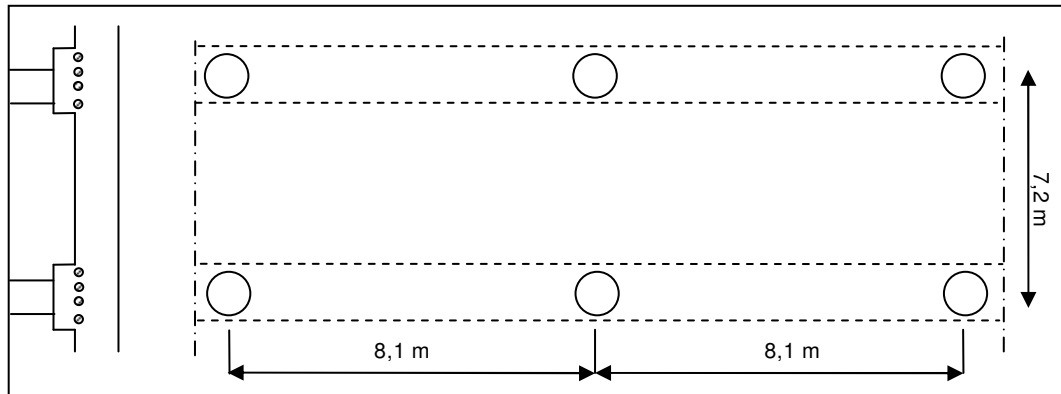
#### 04. Veiligheid

Bij het belang van de veiligheid gaat het voornamelijk om het wegnemen van de kans dat tijdens het tweezijdig spannen twee keer op hetzelfde punt de wiggen zich vastzetten in het voorspanstaal, waardoor een verzwakking van het voorspanstaal kan optreden.

### 3.3.1. Constructief belang

Om te kunnen bepalen wat de invloed is in wrijvingsverlies op de spanningen in het beton en de voorspanstreng, is een berekening gemaakt.

De voorbeeldberekening is gebaseerd op een vloer die ook is gebruikt voor het meten van de wrijvingsverliezen. In figuur 3.1 is de schematisering van de vloer weergegeven.



Figuur 3.1 Schematisering vloer

Uitgangspunt van de berekening:

- berekening volgens de evenwichtsmethode;
- strokenvloer, onderlinge afstand 7,2 meter en overspanning strook van 8,1 meter;
- totale lengte vloer = 48 meter (zes overspanningen);
- voorspanning strengen = vier strengen FeP 1860, type Nedri 12,9
- wrijvingsverlies theorie (NEN 6720) = 46 kN (bij een strook van 48 meter);
- wrijvingsverlies praktijkmeting = 22 kN (bij een strook van 48 meter).

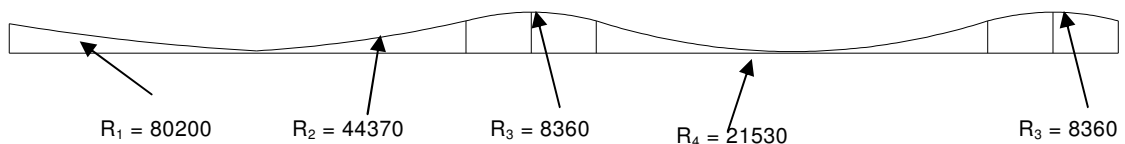
De voorspankracht is omgezet naar een gelijkmatig verdeelde belasting, door gebruik te maken van de boogstraal van de voorspanstreng (bepaald met behulp van werktekeningen):

$R_1 = 80200$  m ter plaatse van eindveld (met lengte van 0 tot 4 m)

$R_2 = 44370$  m ter plaatse van eindveld (met lengte van 4 tot 6.8 m)

$R_3 = 8360$  m ter plaatse van steunpunt

$R_4 = 21530$  m ter plaatse van tussenveld



Figuur 3.2 Overzicht boogstralen voorspanstreng

Voorbeeld berekening voorspanbelasting:

Boogstraal ( $R_4$ )	= 21530 m
Lengte veldelement	= 5.62 m
Hoek = lengte / boogstraal	= 0.26 rad, optellen bij hoek van eerste overspanning levert 0.67 rad
Voorspankracht veld $R_4$	= 133 kN
Voorspanbelasting $R_4$	= $133 / 21.53 = 6.2$ kN/m

De volgende belastingen zijn meegenomen in de beschouwing ten aanzien van de spanningen:

Permanente belasting:	vloer $24 \text{ kN/m}^3 \times 0.19 \text{ m (dikte)} \times 6 \text{ m}$	= 27.4 kN/m
	strook: $24 \text{ kN/m}^3 \times 0.38 \text{ m (dikte)} \times 1.2 \text{ m}$	= 10.9 kN/m
Rustende belasting:	$1.2 \text{ kN/m}^2 \times 7.2 \text{ m}$	= 8.6 kN/m
Veranderlijke belasting:	$5.0 \text{ kN/m}^2 \times 7.2 \text{ m}$	= 36.0 kN/m
Voorspanbelasting:	afhankelijk van element, alle waarden vermenigvuldigd met factor 4 (vier voorspanstrengen per strook aanwezig)	

Er is onderscheid gemaakt tussen momenten ten gevolge van uitvoeringsfase (belasting ten gevolge van eigen gewicht en voorspanbelasting) en de gebruikersfase (alle belastingen). De momentenlijnen van de betreffende fasen zijn terug te vinden in figuur 3.3 t/m figuur 3.6.

#### Momentenlijn 1A (zie figuur 3.3)

- Zonder veranderlijke belasting
- Voorspankracht volgens berekening NEN



Figuur 3.3 Momentenlijn 1A

#### Momentenlijn 1B (zie figuur 3.4)

- Zonder veranderlijke belasting
- Voorspankracht volgens metingen



Figuur 3.4 Momentenlijn 1B

#### Momentenlijn 2A (zie figuur 3.5)

- Met veranderlijke belasting
- Voorspankracht volgens berekening NEN



Figuur 3.5 Momentenlijn 2A

Momentenlijn 2B (zie figuur 3.6)

- Met veranderlijke belasting
- Voorspankracht volgens metingen



Figuur 3.6 Momentenlijn 2B

De grootste verschillen in momenten afkomstig van de bovenstaande figuren (figuur 3.3, figuur 3.4, figuur 3.5 en figuur 3.6) zijn in tabel 3-2 naast elkaar gezet.

Tabel 3-2 Grootste momenten berekening spanningsverloop

	Zonder veranderlijke belasting		Met veranderlijke belasting	
	Theorie	Praktijk	Theorie	Praktijk
Steunpunt 1 – 2	-271.9 kNm	-270.4 kNm	-521.7 kNm	-520.3 kNm
Steunpunt 4 – 5	-168.1 kNm	-156.2 kNm	-349.7 kNm	-337.9 kNm
Veld 5	51.3 kNm	41.0 kNm	131.0 kNm	120.2 kNm

Vervolgens zijn de verschillen van de momenten uitgerekend en in tabel 3-3 naast elkaar gezet.

Tabel 3-3 Verschillen grootste optredende momenten

	Verschil (theorie – praktijk) zonder veranderlijk		Verschil (theorie – praktijk) met veranderlijk	
	kNm	%	kNm	%
Steunpunt 1 – 2	-1.49 kNm	-0.6 %	-1.48 kNm	-0.3%
Steunpunt 4 – 5	- 11.81 kNm	-7.6%	- 11.81 kNm	-3.5%
Veld 5	- 10.30 kNm	-25.1%	- 10.78 kNm	-9.0%

De constructie is gedimensioneerd op de grootste momenten in het veld en ter plaatse van het steunpunt. Bij het veld is dit gedeelte 4 (verschil 7.3 kNm) en bij het steunpunt 1 – 2 ontstaat grootste moment (verschil van 1.5 kNm).

Om te bepalen wat het effect is op de spanningen, zijn de spanningen bovenin en onderin het beton uitgerekend (tabel 3-4 en tabel 3-5).

Tabel 3-4 Spanningen zonder veranderlijke belasting

	Spanningen zonder veranderlijke belastingen (lengte 48 m)							
	Onderin				Bovenin			
	Theoretisch	Praktisch	Theoretisch	Praktisch	Theoretisch	Praktisch	Theoretisch	Praktisch
Steunpunt 1-2	5.92	N/mm <sup>2</sup>	5.88	N/mm <sup>2</sup>	2.80	N/mm <sup>2</sup>	2.78	N/mm <sup>2</sup>
Steunpunt 4-5	3.66	N/mm <sup>2</sup>	3.40	N/mm <sup>2</sup>	1.73	N/mm <sup>2</sup>	1.61	N/mm <sup>2</sup>
Veld 5	1.12	N/mm <sup>2</sup>	0.89	N/mm <sup>2</sup>	0.53	N/mm <sup>2</sup>	0.42	N/mm <sup>2</sup>

Tabel 3-5 Spanningen met veranderlijke belasting

	Spanningen met veranderlijke belastingen (lengte 48 m)							
	Onderin				Bovenin			
	Theoretisch	Praktisch	Theoretisch	Praktisch	Theoretisch	Praktisch	Theoretisch	Praktisch
Steunpunt 1-2	11.35	N/mm <sup>2</sup>	11.32	N/mm <sup>2</sup>	5.37	N/mm <sup>2</sup>	5.35	N/mm <sup>2</sup>
Steunpunt 4-5	7.61	N/mm <sup>2</sup>	7.35	N/mm <sup>2</sup>	3.60	N/mm <sup>2</sup>	3.48	N/mm <sup>2</sup>
Veld 5	2.85	N/mm <sup>2</sup>	2.62	N/mm <sup>2</sup>	1.35	N/mm <sup>2</sup>	1.24	N/mm <sup>2</sup>

In de tabellen is terug te vinden dat de spanningen afnemen. De grootste verschillen zijn terug te vinden bij een veldmoment en steunpuntmoment dat niet maatgevend is (veld 5). De maximale afname van de spanning is 0.26 N/mm<sup>2</sup> (onderin betonconstructie ter plaatse van steunpunt 4-5, zonder veranderlijke belasting).

Uit bovenstaande gegevens is op te maken dat het verschil tussen de praktische en theoretische wrijvingsverliezen, die van invloed zijn op de spanningen, klein is. Het onderzoek heeft bij de bepaling van de spanning weinig betekenis en het constructieve belang is geen zwaarwegende onderbouwing voor het onderzoek.

### 3.3.2. Economisch belang

Het eerste mogelijke belang in economische zin is de vermindering van het aantal voorspanstrengen in de constructie. Door het beter benaderen van de wrijvingsverliezen kan een voorspanstreng optimaler worden gebruikt.

Bij een strokenvloer is, afhankelijk van de noodzakelijke kracht, het aantal voorspanstrengen beperkt (twee tot zes voorspanstrengen per strook). Een verlaging van het aantal voorspanstrengen kan pas worden toegepast als het wrijvingsverlies een substantieel deel afneemt. Dit is niet realistisch en kan ook niet worden meegenomen als belang voor het onderzoek.

Een tweede mogelijke belang in economische zin is een vermindering van de spanvoorzieningen. Bij lange kabels is het noodzakelijk dat van twee zijden wordt gespannen. Daardoor zijn er ook twee spanankers en extra bijlegwapening noodzakelijk.

Bij een vermindering van de wrijvingsverliezen is het mogelijk om langere elementen aan slechts één zijde de spannen. Het economische voordeel kan dus worden gevonden in het verminderen van de spanvoorzieningen.

In plaats van een spananker moet een blinde verankering in het beton worden aangebracht. Het verschil in kosten tussen een spananker en een blinde anker is ongeveer 10 euro per stuk.

De kostenbesparing bij vermindering van het aantal spanvoorzieningen is niet alleen materiaalkosten. Het aantal arbeidsuren wordt verminderd bij de volgende onderdelen:

- Ontwerpkosten (kosten constructeur);
- Uitvoeringskosten (plaatsen spanankervoorzieningen, aanpassen bekisting ter plaatse van spanankervoorziening, spannen voorspanstrengen, beschermen spanankervoorziening);
- Controlekosten.

Voor de vermindering van kosten door verlaging van de arbeidsuren is alleen een inschatting te maken. De aannahme hierbij is een werkvermindering van 20 minuten (ontwerp = 2 minuten, uitvoering 15 minuten en controle 3 minuten) per spananker. Uitgaande van een uurloon van 70 euro zijn de vermindering van de kosten door verlaging van de arbeidsuren gelijk aan 23 euro.

Het totaal aan besparingen ten gevolge van het toepassen van minder spanankers bij langere voorspanstrengen is € 10,- + € 23,- = € 33,- per stuk. Niet bij alle voorspanstrengen wordt gebruik gemaakt van twee spanankers. De kostenbesparing telt dus niet voor alle voorspanstrengen.

### 3.3.3. Uitvoeringstechnisch belang

Voor elke voorspanstreng wordt een spanformulier opgesteld. Hierin staat omschreven:

01. wat de aan te brengen voorspankracht moet zijn (berekend);
02. welke voorspankracht is aangebracht (gemeten);
03. wat de verlenging moet zijn (berekend);
04. welke verlenging is opgetreden (gemeten).

De punten 01 en 02 moeten gelijk aan elkaar zijn en de punten 03 en 04 moeten aan elkaar gelijk zijn. Uit de praktijk blijkt dat de punten 01 en 02 inderdaad gelijk zijn. Echter de verlenging van punt 03 en 04 zijn niet aan elkaar gelijk.

De uitvoerende partij moet bij een afwijking dit melden bij opdrachtgever en constructeur. Deze partijen moeten vervolgens nagaan waar het verschil aan te wijten is.

De overleg- en onderzoekskosten voor het nagaan van deze afwijkingen komen door het verschil van wrijvingsverlies telkens weer terug. Door een betere benadering van de wrijvingsverliezen kunnen de overleg- en onderzoekskosten een stuk worden teruggedrongen.

### 3.3.4. Veiligheidsbelang

Tijdens het spannen aan de ene spanzijde, ontstaat ten gevolge van de voorspankracht een beet door de wigverankering aan de andere spanzijde. Nadat de totale voorspankracht aan de eerste spanzijde is bereikt, wordt aan de tweede spanzijde gespannen.

Vanwege de grotere voorspankracht die aanwezig is (door minder wrijvingsverlies) in het tweede spananker, kan de berekende verlenging bij het tweede spananker niet worden bereikt. Door een kortere verlenging aan de tweede spanzijde kan de wig tweemaal op dezelfde plaats de voorspanstreng vastgrijpen. Hierdoor ontstaat plaatselijk een beschadiging van het voorspanstaal.

Tevens kan het zo zijn dat de aangebrachte verlenging bij het tweede spananker, kleiner is dan de intrekking die optreedt tijdens het lossen van de voorspanstreng. De voorspankracht die is aangebracht, wordt na het lossen van de voorspanstreng, lager dan wanneer slechts aan één zijde wordt gespannen.

### 3.4. Conclusie belangen

Niet alle belangen zijn van invloed voor de bepaling van de importantie van het onderzoek:

01. Constructief belang: de spanningen in het beton veranderen nauwelijks bij een betere benadering van de wrijvingsverliezen. Voor de constructieberekeningen is het onderzoek van ondergeschikt belang;
02. Economisch belang: door het nauwkeuriger bepalen van de wrijvingsverliezen kunnen de kosten bij langere voorspanstrengen worden verlaagd. Deze kosten spelen een rol bij het onderzoek;
03. Uitvoeringstechnisch belang: een vermindering van de overleg- en onderzoekskosten voor het niet aansluiten van de berekende en gemeten verlengingen van de voorspanstrengen kan ook bij het economische belang worden meegerekend.  
Een bouwtijd met weinig stagnaties door onvolkomenheden, ten gevolge van verkeerde bepaling van de wrijvingsverliezen, kan wel worden meegenomen bij het uitvoeringsbelang. Dit belang speelt ook een rol voor het onderzoek.
04. Veiligheidsbelang: het belang van de veiligheid is de belangrijkste reden om het onderzoek uit te werken. Op de plaats waar de wiggen zichzelf vastbijten in de voorspanstreng is het enige deel waar de voorspanstreng de kracht overbrengt naar het omliggende beton.

## 4. Literatuur

### 4.1. Geschiedenis

#### 4.1.1. Voorspanning algemeen

De geschiedenis van de voorspanning is op te delen in een aantal fasen [25].

De eerste fase van de ontwikkeling van voorgespannen beton was tussen 1886 en 1927. In deze periode werd er voornamelijk **intuïtief geëxperimenteerd** zonder een theoretische achtergrond. In 1872 is het Jackson in de Verenigde Staten en in 1888 is het Doering in Duitsland die zich bezighielden met het ontwerpen van betonnen vloerplaten voorzien van aangespannen staaldraden.

De volgende fase was tussen 1927 en 1940. In deze periode is een eerste basis gelegd voor de **theoretische onderbouwing**. De Franse Ingenieur Eugène Freyssinet heeft hier een grote bijdrage aan geleverd. Hij stelde dat blijvende voorspanning alleen mogelijk is indien gebruik gemaakt wordt van staal met een zeer hoge vloeigrens.

De derde fase van is vooral gericht op **ontwikkeling en verspreiding** van het principe voorgespannen beton. Vanaf 1940 wees prof. Magnel van de Rijksuniversiteit in Gent op de mogelijkheden van de techniek en richtte zich op het uitwerken van rekenmethoden. Daarnaast heeft hij een eigen systeem ontwikkeld voor de verankering van de voorspanning.

De periode vanaf 1951, ook wel de laatste fase, kenmerkte zich voornamelijk door **veelvuldig toepassen** van voorspanning. Voorgespannen beton levert voor het eerst een economische oplossing bij grote overspanningen, geringe constructiehoogte en slank ontwerp.

#### 4.1.2. Voorspanning zonder aanhechting

Voorspanning zonder aanhechting is voor het eerst in 1925 in de Verenigde Staten toegepast door R.E. Dill uit Alexandria, Nebraska bij een cilindrische tankconstructie [26].

In de jaren '30 van de twintigste eeuw was de toepassing van voorspanning zonder aanhechting beperkt tot het voorspannen van cilindrische tanks aan de buitenzijde. Er was nog geen sprake van corrosiebescherming door een vet en HDPE-omhulling. De strengen werden gegalvaniseerd of geschilderd om zo beschermd te zijn tegen corrosie [19].

De experimentele fase van het toepassen van voorspanning zonder aanhechting bij gebouwen vindt plaats vanaf midden jaren '50 in de twintigste eeuw. Vanaf toen zijn er ook ontwikkelingen geweest op het gebied van corrosiebescherming door vet en HDPE-omhulling [5].

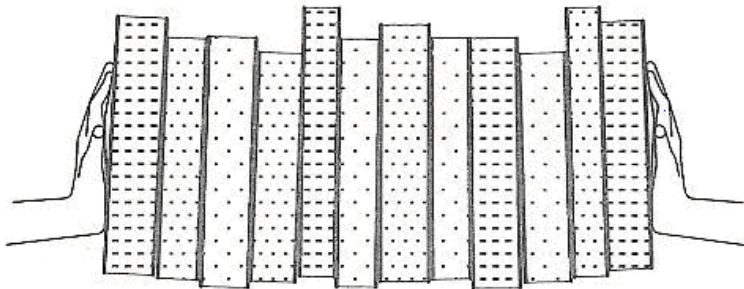
In Nederland werd tijdens de ontwikkeling van de voorspanning met nagerekt voorspanstaal al snel de invloed van de hechting tussen de voorspanstrengen en het beton onderkend op het scheurgedrag en de breukveiligheid [9]. Om de voordelen van de goede hechting zo goed mogelijk te benutten, werd veel tijd en moeite gestoken in de ontwikkeling van betrouwbare injectiemethoden. Hierin slaagde men, zodat de voorspanstrengen zonder aanhechting in Nederland uit de gratie raakte en in de beginfase van de markt verdwenen.



Het duurde tot 1969 totdat in Nederland het Atlas-voorspanstelsysteem voor het eerst geïntroduceerd werd.

## 4.2. Principe

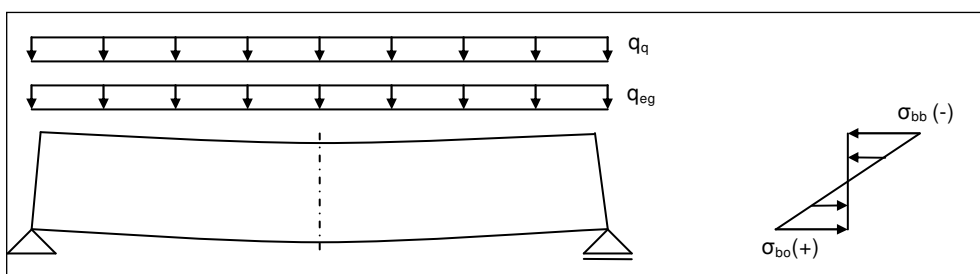
In figuur 4.1 is een duidelijk voorbeeld te zien van een constructie die zonder eigen mogelijkheid van het opnemen van trekkrachten zich kan gedragen als een balk. Deze stapel boeken wordt door de "voorspanning" één constructie, die zo in zijn geheel van de plank af gehaald kan worden [24].



Figuur 4.1 Stapel boeken die eigen gewicht dragen door 'voorspanning'

Het principe van voorspannen is het aanbrengen van een drukspanning in het beton op de plaats waar kritieke trekspanningen optreden.

Om dit principe duidelijk te maken is een voorbeeld van een statische ligger uitgewerkt [17]. In de ligger ontstaat ten gevolge van het eigen gewicht en de veranderlijke belasting een trekspanning aan de onderzijde van de ligger en een drukspanning aan de bovenzijde van de ligger. In figuur 4.2 zijn de aanwezige spanningen weergegeven, indien een balk wordt belast door eigen gewicht en veranderlijke belasting.



Figuur 4.2 Spanning balk ten gevolge van eigen gewicht en veranderlijke belasting

Wanneer de trekspanning onderin de ligger niet meer opgenomen wordt door het beton, zal de trekspanning worden opgenomen door de zachtstaalwapening bij een gewapende ligger. De ligger vertoont scheurvorming, maar zolang de scheurvorming niet boven de maximaal vastgestelde scheurwijdte komt, zal de levensduur van de ligger niet worden aangetast.

Om meer trekspanning op te nemen, kan zachtstaalwapening worden toegevoegd. De ligger zal uiteindelijk bezwijken bij het beton bovenin de ligger (maximale drukspanning).

Er is een maximum voor het plaatsen van zachtstaalwapening. De reden: er ontstaat een brosse breuk, omdat het staal niet gaat vloeien. Een brosse breuk is niet gewenst, omdat er geen zichtbare vervorming plaats vindt.

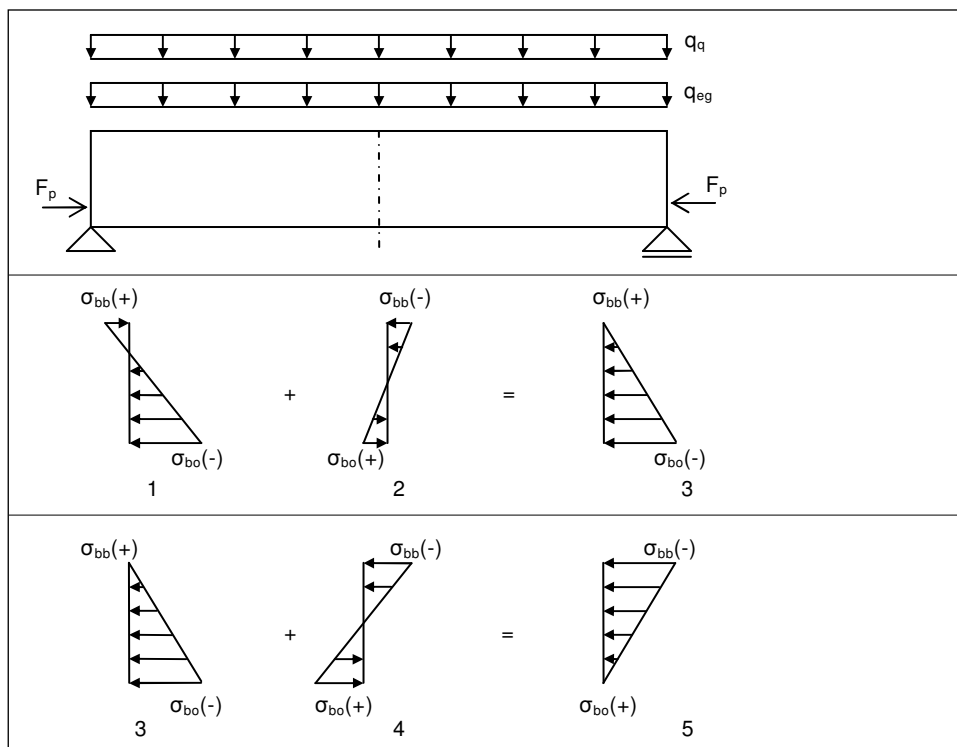
Om te zorgen dat de ligger toch maximaal belast kan worden zonder dat er scheurvorming ontstaat, kan een drukkracht ( $F_p$ ) onderin de ligger worden aangebracht. In de beginsituatie vormen er, door het aanbrengen van de grote drukkracht ( $F_p$ ), grote drukspanningen in de onderkant van de ligger. Daarnaast zal een kleine trekspanning bovenin de ligger ontstaan.

Na superpositie van de belasting van de voorspanning en het eigen gewicht (na het ontkisten en verwijderen van de ondersteuningsconstructie), is de spanning bovenin de constructie nagenoeg nul en is onderin de ligger nog steeds een drukspanning aanwezig.

Vervolgens zal na het aanbrengen van de veranderlijke belasting de drukspanning onderin de ligger uiteindelijk veranderen naar een toelaatbare trekspanning/drukspanning onderin de ligger.

In figuur 4.3 zijn alle spanningen weergegeven die optreden in het midden van de balk:

1. Spanning ten gevolge van aangebrachte voorspankracht ( $F_p$ );
2. Spanning ten gevolge van eigen gewicht constructie ( $q_{e.g.}$ );
3. Spanning ten gevolge van superpositie voorspankracht en eigen gewicht constructie;
4. Spanning ten gevolge van veranderlijke belasting ( $q_q$ );
5. Spanning ten gevolge superpositie van alle belastingen (voorspankracht, eigen gewicht, veranderlijke belasting).



Figuur 4.3. Spanning in het midden van de ligger

## 4.3. Verschillen mechanisme VMA – VZA

### 4.3.1. Mechanisme

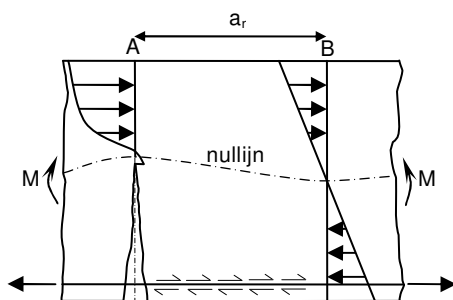
De mechanismen van VMA en VZA zijn verschillend. Dit komt door de aanwezigheid van aanhechting van de strengen aan het beton bij een VMA-systeem en de afwezigheid van deze aanhechting bij het VZA-systeem [14], [17].

#### 4.3.1.1. Voorspanning met aanhechting

Bij een VMA-systeem ontstaat door een buigend moment, na overschrijding van de lokale treksterkte van het beton, een scheur in het beton ter plaatse van doorsnede A (zie figuur 4.4).

De staalspanning is ter plaatse van doorsnede A het hoogst. Afhankelijk van bepaalde eigenschappen, zoals staalspanning en aanhechtingsspanning, zal de spanning in het beton na een afstand  $a_r$  weer zijn afgenomen tot eenzelfde als bij een ongescheurde toestand (doorsnede B).

Bij doorsnede B kan opnieuw een scheur ontstaan na overschrijving van de lokale treksterkte. Dit levert een nagenoeg gelijkmatige scheurenpatroon.

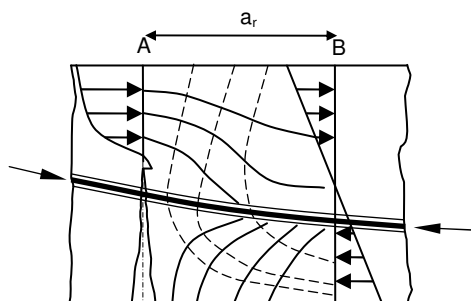


Figuur 4.4 Verloop spanning voorspanning met aanhechting

#### 4.3.1.2. Voorspanning zonder aanhechting

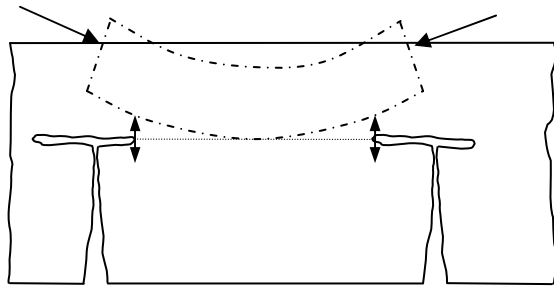
Bij het optreden van een eerste scheur bij een voorgespannen constructie zonder aanhechting (VZA), zal geen gelijk scheurenpatroon ontstaan zoals omschreven is bij het VMA-systeem.

Er kan een scheurenpatroon ontstaan met regelmatige afstanden tussen de scheuren, ondanks het ontbreken van de aanhechting van de voorspanstreng. Dit scheurenpatroon kan ontstaan door de schijfwerking van het beton (zie figuur 4.5).



Figuur 4.5 Verloop spanning voorspanning zonder aanhechting

Omdat de voorspanstrengen slechts verankerd zijn bij de verankering, zal een grote verlenging optreden van de elementen. Door deze verlenging gaat de drukzone van het beton buigen (zie figuur 4.6). Deze buiging veroorzaakt een horizontale scheur in het vrijwel spanningsloze deel tussen de scheuren en daardoor ontstaan zogenaamde vorkscheuren.



Figuur 4.6 Scheurvorming ten gevolge van buiging van de drukzone

Het gevolg is dat de drukzone de maatgevende factor is en niet de 0.1%-rekgrens van het voorspanstaal bij een voorgespannen constructie waarbij gebruik gemaakt wordt van elementen zonder aanhechting. Dit betekent dat de vloeigrens van staal niet wordt bereikt.

### 4.3.2. Voor- en nadelen VZA

Het toepassen van het VZA-systeem heeft een aantal voordelen ten opzichte van het VMA-systeem [20]:

- De voorspanstreng is op de bouwplaats al tegen corrosie beschermd;
- het is niet nodig om een grote dekking op de voorspanstreng aan te brengen door de aanwezige corrosiebescherming. Hierdoor kan, in combinatie met de kleine diameter van de voorspanstreng, een grote excentriciteit van de voorspanstreng worden gerealiseerd;
- het aanbrengen van de voorspanstreng gaat eenvoudig en snel;
- voorspanstreng kan altijd worden nagespannen (indien voorspanstreng is afgekort niet) of worden vervangen;
- voorspanstreng zonder aanhechting heeft een geringer wrijvingsverlies;
- toepassing in geringe constructiehoogtes (zoals verdiepingsvloeren) mogelijk;
- injecteren van de voorspankanalen komt te vervallen.

Naast de voordelen zijn er bij de afweging voor VZA-strengen ook een aantal nadelen:

- Er is geen hechting tussen beton en voorspanstreng;
- Bescherming van het totale anker is essentieel, omdat de gehele belasting via het anker wordt overgedragen op het beton;
- Bij een breuk in de VZA-streng vervalt de voorspanning in het hele vloerelement.

## 4.4. Toepassingsgebieden

Het toepassingsgebied van de voorspanning zonder aanhechting heeft twee hoofdgebieden. De eerste toepassing is geënt op prefab tankconstructies. Nadat de betonconstructie is opgebouwd, wordt de voorspanstreng aangebracht en voorgespannen. Bij de tankconstructies is voor de toepassing van de voorspanstreng een onderscheid te maken tussen een monosysteem en een multisysteem. De keuze voor een bepaald systeem is afhankelijk van de afmetingen van de tank.

Een tweede toepassingsgebied van de VZA-streng zijn de vloerconstructies. Bij de vloerconstructie wordt eerst de wapening en de voorspanstreng aangebracht. Hierna wordt de beton gestort en na bereiken van voldoende druksterkte van het beton worden de voorspanstrengen op spanning gebracht.

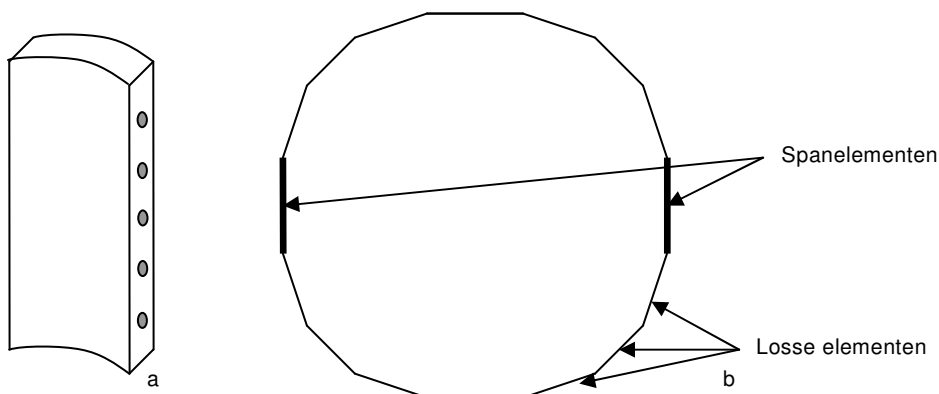
#### 4.4.1. Tankconstructies

Bij het vervaardigen van een tankconstructie kan worden gekozen tussen een traditioneel gekiste tank of voor een prefab vervaardigde tank. De prefab tankconstructie bestaat uit een aantal segmenten die worden samengevoegd tot één tank. In figuur 4.7 is de uitvoering van de rioolwater zuiveringsinstallatie Amsterdam te zien.



Figuur 4.7 VZA toepassing in tankconstructies

Om de tank als één constructie te laten fungeren, worden alle afzonderlijke segmenten voorgespannen met behulp van een zogenaamde ringvoorspanning. In figuur 4.8 is een los element (a) en een samengestelde tankconstructie (b) weergegeven. De samengestelde tank bestaat uit een aantal losse elementen en meerdere zwaar uitgevoerde spanelementen.



Figuur 4.8 Samenvoeging tankconstructie

Na het plaatsen van de elementen wordt de voorspanstreng door een uitsparing geleid (ook wel gaine genaamd). De voorspanstreng wordt vervolgens op spanning gebracht.

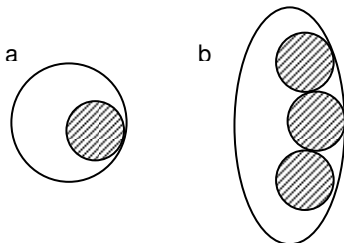
##### 4.4.1.1. Mono- en Multisysteem

De tankconstructies zijn uitvoerbaar in verschillende diameters, afhankelijk van functie en noodzakelijke capaciteit. Bij kleine tankconstructies kan worden volstaan met een enkele voorspanstreng in een gaine. De vorm van de gaine is in deze situatie een ronde buis.

Bij de tanks met een grotere diameter of wandhoogte bestaat de kans dat een enkele voorspanstreng de krachten ten gevolge van de vloeistofdruk niet meer kan opnemen. Om deze

krachten toch op te kunnen nemen, wordt door een aantal gaines niet één maar meerdere voorspanstrengen doorgevoerd.

In figuur 4.9 zijn de situaties weergegeven van een monosysteem na voorspannen en een multisysteem na voorspannen.



Figuur 4.9 Monosysteem (a) en Multisysteem (b)

Groot nadeel bij het multisysteem is dat de onderlinge voorspanstrengen invloed op elkaar uitoefenen. Dit kan veroorzaakt worden door verstrengeling in elkaar. Daarnaast kan een reeds op spanning gebrachte voorspanstreng een nog niet op spanning gebrachte voorspanstreng afklemmen, waardoor een ander wrijvingsverloop kan ontstaan.

#### 4.4.1.2. Spanningsverloop

Het spanningsverloop van de voorspanstreng, die door de gaines lopen, verloopt niet-lineair. De kromming in de losse elementen is constant, doordat de gaines een vaste straal hebben. De kromming ter plaatse van de voegovergang is niet constant, maar verloopt met sprongen. De sprongen in het kabelverloop leveren een extra wrijvingsverlies op. De metingen bij de voegovergangen zijn niet gemeten.

Bij het multisysteem heeft naast de invloed van de niet constante kromtestraal ook de onderlinge invloed door verstrengeling mogelijk een effect. Hierdoor zijn metingen bij de tankconstructies lastig te analyseren.

#### 4.4.1.3. Proefresultaten

Voor dit onderzoek zijn een aantal proefresultaten bekend. In tabel 4-1 zijn een aantal meetresultaten opgeschreven. De afwijkingen van de onderlinge metingen geven vooralsnog geen goed beeld van de optredende wrijvingsverliezen.

Tabel 4-1 Metingen tankconstructies

Fabrikant	Lengte [m]	Diameter [mm]	Wrijvingsverlies [kN]	Voorspankracht [kN]
Tycsa (streng 3B-1)	44.4	15.7	15	208
Tycsa (streng 3B-2)	44.4	15.7	5	208
Tycsa (streng 3B-3)	44.4	15.7	10	208
Tycsa (streng 5B-1)	44.4	15.7	10	208
Tycsa (streng 5B-2)	44.4	15.7	17	208
Tycsa (streng 5B-3)	44.4	15.7	38	208

De metingen van de tankconstructies zijn in het verdere onderzoek ook buiten beschouwing gehouden. De afwijkingen geven geen eenduidig beeld. Daarnaast zijn de invloeden van een niet constante kromtestraal en de mogelijke verstrengeling niet te achterhalen.

#### 4.4.2. Vloerconstructies

Het tweede toepassingsgebied voor voorspanning zonder aanhechting is vloerconstructies en dan voornamelijk bij utiliteitsbouw. Door het toepassen van voorspanning kan de constructiehoogte van de vloer worden beperkt.

De vloerconstructie is meestal uitgevoerd als een strookvloer. Dat wil zeggen een versterkte strook boven de kolommen. In de strook boven de kolommen bevinden zich ook de voorspanstrengen. In figuur 4.10 is een kolomstrook zichtbaar met de aangebrachte voorspanstrengen.



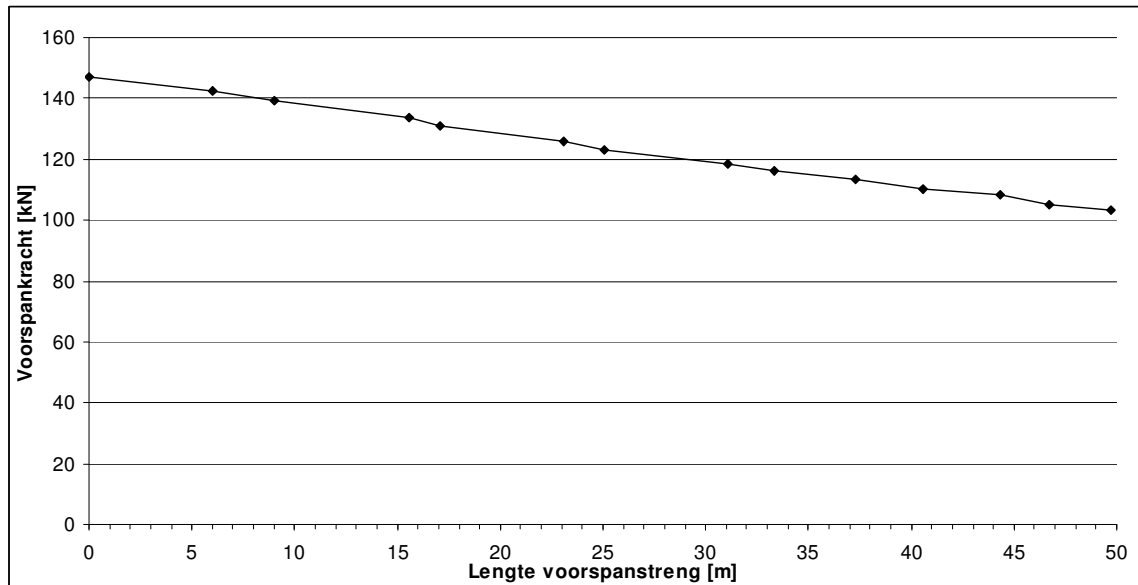
Ter plaatse van de opleggingen is de positie van de voorspanstreng hoog in de vloer gelegen. Bij de velden is de positie van de voorspanstreng zo ver mogelijk naar onderen. De voorspanstreng heeft hierdoor een gekromd kabelverloop. Zo kan optimaal gebruik gemaakt worden van de capaciteit van de voorspanstreng.

*Figuur 4.10 VZA toepassing in vloerconstructies*

#### 4.4.2.1. Spanningsverloop

Het spanningsverloop bij voorspanstrengen in vloerconstructies is nagenoeg lineair. Ter plaatse van de krommingen in het kabelverloop neemt de wrijving toe en de voorspankracht af. Bij de buigpunten van positieve naar negatieve kromtestralen is het wrijvingsverlies niet lineair, omdat er geen wrijving ten gevolge van de kromming optreedt.

Een voorbeeld van een mogelijke krachtenverloop is weergegeven in figuur 4.11.



Figuur 4.11 Indicatie voorspankracht bij vloerconstructies

#### 4.4.2.2. Proefresultaten

De proefresultaten van de vloerconstructies zijn gebruikt voor een verdere analyse. Bij de analyse is onderzocht welke factoren van invloed zijn op het wrijvingsverlies.



## 4.5. Wrijving bij voorspanning

### 4.5.1. Inleiding

#### 4.5.1.1. Invloedsfactoren

Het verlies door wrijving bij voorspanning is opgebouwd uit een aantal invloedsfactoren, te weten:

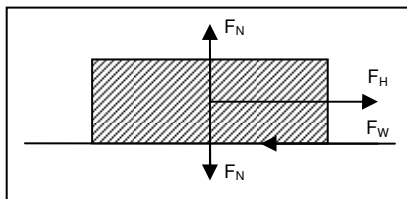
01. Wrijving tussen de voorspanstreng en de omhulling;
02. Som van de totale hoekverdraaiing;
03. Lengte van de totale voorspanstreng;
04. Onnauwkeurigheid van het doorlopen van de voorafgestelde hoekverdraaiing (ook wel Wobble-effect genaamd).

#### Wrijving algemeen

Als er op een element naast de normaalkracht [ $F_N$ ], ten gevolge van het eigen gewicht, een horizontale kracht [ $F_H$ ] werkt, ontstaat een wrijvingskracht [ $F_W$ ]. De verhouding tussen de wrijvingskracht [ $F_W$ ] en de normaalkracht [ $F_N$ ] is de wrijvingscoëfficiënt.

De wrijvingscoëfficiënt is een dimensieloos getal dat de mate van wrijving tussen twee oppervlakken aangeeft. Bij een ruw oppervlak is de wrijvingscoëfficiënt groter dan bij een glad oppervlak.

De aanwezige krachten zijn weergegeven in figuur 4.12.



Figuur 4.12 Krachtenverloop element

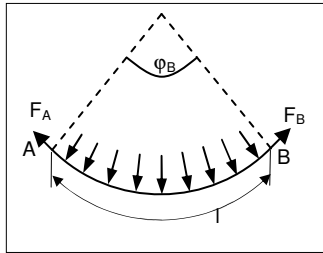
#### 01. Wrijving tussen de voorspanstreng en de omhulling

Door een gekromd kabelverloop van de voorspanstreng ontstaan radiaal gerichte krachten. Deze radiale krachten kunnen als normaalkracht worden beschouwd. Hierdoor ontstaat wrijving tussen de voorspanstreng en de omhulling.

#### 02. Som van de totale hoekverdraaiing

Het verloop van een voorspanstreng is meestal gekromd (afhankelijk van het momentenverloop). Om de voorspanstreng in de gewenste gekromde vorm te houden, ontstaan radiaal gerichte krachten.

De radiaal gerichte krachten ten gevolge van de kromming in de voorspanstreng zijn geschematiseerd in figuur 4.13.



Figuur 4.13 Radiaal gerichte kracht ten gevolge van gekromde voorspanstreng

Als de kromming van de voorspanstreng ( $\varphi_B$ ) groter is, neemt de radiaal gerichte kracht af. De invloed die de kromming heeft op het totale wrijvingsverlies is dus afhankelijk van de doorlopen hoek van de voorspanstreng. Komen in de voorspanstreng tegengestelde krommingen voor, dan moet als  $\varphi$  worden gerekend met de som van de afzonderlijke hoeken.

### 03. Lengte van de totale voorspanstreng

De lengte van de voorspanstreng is ook een factor die van invloed is op het verlies ten gevolge van wrijving. Bij een langere voorspanstreng is de lengte waarover wrijving ontstaat ook groter. De lengte heeft daarmee ook een directe relatie met de wrijvingsverlies.

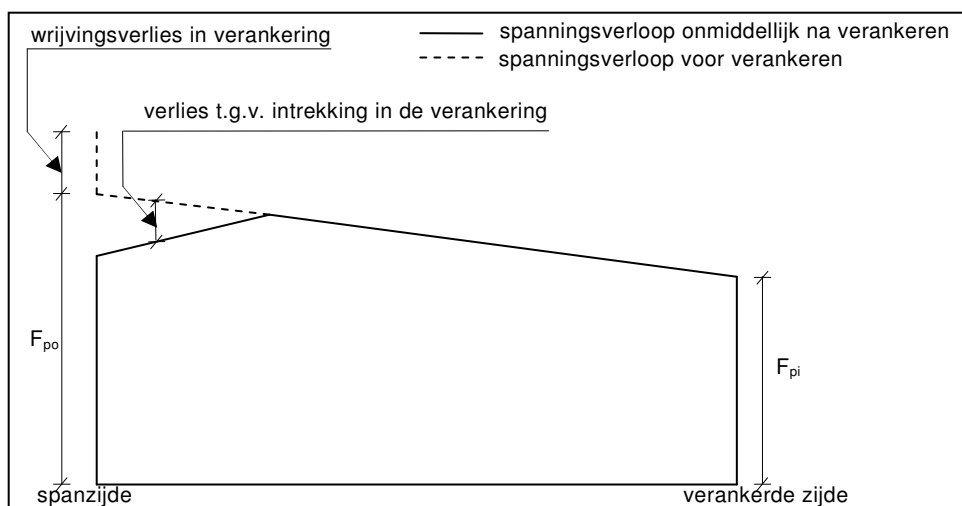
### 04. Onnauwkeurigheid van het doorlopen van de voorafgestelde hoekverdraaiing

Naast de wrijvingscoëfficiënt is ook een factor omschreven voor de onvermijdelijke oneffenheden en toevallige krommingen van de voorspanstrengen die van invloed zijn op het verlies door wrijving. De factor is beter bekend als "Wobble-effect". In het Engels; Wobble: "To move or rotate with an uneven or rocking motion or unsteadily from side to side".

## 4.5.1.2. Spanningsverloop

Het wrijvingsverlies is niet over de gehele lengte van de voorspanstreng gelijk. Aan de spanzijde is het wrijvingsverlies nul ten opzichte van de aangebrachte voorspankracht, de maximale spanning wordt hier bereikt.

In figuur 4.14 is te zien hoe het verloop van de spanning zal zijn. Het verschil tussen  $F_{po}$  (voorspankracht direct na spannen) en  $F_{pi}$  (aanvangsvoorspankracht) is het verlies ten gevolge wrijving.



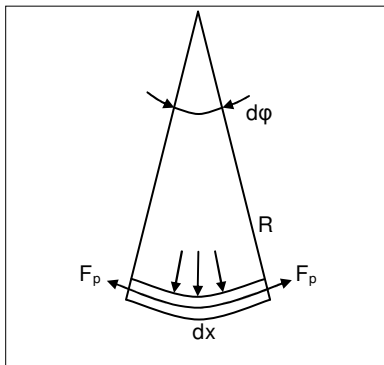
Figuur 4.14 Spanningsverloop voorspanning

## 4.5.2. Bestaande modelvorming

De kromtestraal van de voorspanstreng ten opzichte van de diameter van de voorspanstreng is zeer groot. Hierdoor kan de buigstijfheid van de voorspanstreng worden verwaarloosd.

Wanneer verondersteld wordt dat de wrijving uitsluitend een gevolg is van het gebogen verloop van de voorspanstreng en van een constant wrijvingscoëfficiënt  $\mu$  – slechts afhankelijk van de ruwheid tussen de voorspanstreng en van de omhulling – dan kan de kracht  $F$  worden berekend.

Stel een stukje van de voorspanstreng in een willekeurig deel van de volledige voorspanstreng voor. Dit stukje is weergegeven in figuur 4.15, met lengte  $dx$ , straal  $R$  en hoek  $d\varphi$ .



Figuur 4.15 Krommingsdruk op kabelelement met lengte  $Rd\varphi$

Uit evenwichtsvoorwaarden volgt:

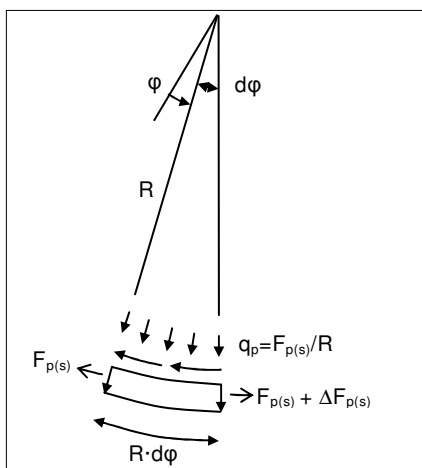
$$q_p \cdot R \cdot d\varphi = F_p \cdot d\varphi \quad \text{ofwel:} \quad q_p = \frac{F_p}{R} \quad \{4.1\}$$

Bij de wrijvingscoëfficiënt  $\mu$  voor het contactvlak voorspanstreng - omhulling is de wrijvingskracht:

$$\mu \cdot q_p = \mu \cdot \frac{F_p(x)}{R} \quad \{4.2\}$$

In figuur 4.16 is kabel met lengte  $R \cdot d\varphi$  nogmaals weergegeven. Uit het evenwicht volgt:

$$\Delta F_p(x) = -\mu \cdot \frac{F_p(x)}{R} \cdot R \cdot d\varphi \Rightarrow \frac{\Delta F_p(x)}{F_p(x)} = -\mu \cdot d\varphi \quad \{4.3\}$$



Figuur 4.16 Wrijving voorspanstreng - omhulling

Uit de integratie:

$$\int \frac{dF_p(x)}{F_p(x)} = \int -\mu \cdot d\varphi \quad \{4.4\}$$

volgt:

$$\ln(F_p(x)) = -\mu \cdot \varphi + C \quad \{4.5\}$$

Met behulp van de randvoorwaarden  $F_p(x) = F_p$  en  $\varphi = 0$  voor  $x = 0$  wordt gevonden:

$$C = \ln(F_p) \quad \{4.6\}$$

Substitutie van vergelijking 4.6. in vergelijking 4.5. en vervanging van  $F_p(x)$  door  $F_p(\varphi)$  geeft:

$$\ln \frac{F_p(\varphi)}{F_p} = -\mu \cdot \varphi \quad \text{ofwel:} \quad F_p(\varphi) = F_p \cdot e^{-\mu \cdot \varphi} \quad \{4.7\}$$

Bij voorspanstrengen waar een tegengestelde kromming voor komt, moeten de doorlopen hoek  $\varphi$  van alle afzonderlijke krommingen bij elkaar worden opgeteld.

In de bovenstaande modellering is geen rekening gehouden met de invloed van het Wobble-effect. Er zijn een aantal onderzoeken verricht naar de invloed van het niet doorlopen van de voorafgestelde hoekverdraaiingen en hoe deze moet worden meegenomen in de berekening van de wrijving.

Het eerste onderzoek is uitgevoerd door Cooley [1]. Hij stelde dat in formule 4.7 naast de invloed van de som van de doorlopen hoek ( $\varphi$ ) ook de lengte van het wrijvingsoppervlak meegenomen dient te worden. Hiervoor heeft hij de elementaire lengte  $dx$  verdeeld in korte rechte stukjes en deze stukjes gekoppeld door bogen.

Formule 4.3 is door de verdeling in rechte stukjes en bogen om te schrijven tot:

$$\frac{\Delta F_p(x)}{F_p(x)} = -(\mu \cdot d\varphi + k_1 x) \quad \{4.8\}$$

Waarbij  $k_1$  een vervangende "wrijvingscoëfficiënt" is voor de rechte stukjes en  $x$  de lengte van de voorspanstreng is.

Na het uitwerken van formule 4.8 (volgens formule 4.4 t/m 4.7) ontstaat de volgende formule:

$$F_p(\varphi) = F_p \cdot e^{-(\mu \cdot \varphi + k_1 x)} \quad \{4.9\}$$

De formule 4.9 is in tegenstelling tot formule 4.7 wel te gebruiken bij voorspanstrengen met een recht kabelverloop.

Een tweede onderzoek is verricht door Fritz [2]. Hij meent, gebaseerd op een aantal proeven, dat bij een toenemende som van doorlopen hoeken ( $\varphi$ ) de invloed van het Wobble-effect afneemt. Zijn advies is om formule 4.7 te gebruiken in plaats van formule 4.10.

Dreux [3] houdt alleen voor het rechte kabelverloop van de voorspanstreng rekening met het Wobble-effect en voor de gebogen gedeelten alleen met de wrijvingscoëfficiënt ( $\mu$ ).

Een volgend onderzoek is uitgevoerd door Knesch [4]. In dit onderzoek zijn de gemiddelde toevallige hoekverdraaiingen per meter  $\varphi_1$  voor een brug in een recht traject en één welke gelegen is in en bocht ( $R = 174$  m) met elkaar vergeleken. Bij de metingen is uitgegaan van een wrijvingscoëfficiënt van  $\mu = 0.256$ . De gemeten Wobble-effecten waren 0.0064 rad/m en 0.0061 rad/m. Conclusie van het onderzoek was dat de invloed van de toevallige hoekverdraaiingen zeer gering is.

De Commissie voor Uitvoering van Research [5] stelde vervolgens dat: "Gezien de definitie van de wrijvingscoëfficiënt is het niet aannemelijk dat deze in een rechte voorspanstreng een andere waarde zou hebben dan wanneer dezelfde voorspanstreng gebogen zou zijn. Om beide factoren mee te nemen in de formule voor de wrijvingsverliezen kan de uiteindelijke formule beter als volgt worden geformuleerd:"

$$F_p(x) = F_p \cdot e^{-\mu(\varphi + \varphi_1 x)} \quad \{4.10\}$$

Uit de literatuur is gebleken dat de invloeden van de wrijvingscoëfficiënt en het Wobble-effect niet hetzelfde worden beoordeeld en er daardoor verschillende benaderingen voor het verlies ten gevolge van de wrijving zijn:

$$I \quad F_p(\varphi) = F_p \cdot e^{-\mu \cdot \varphi} \quad \{4.7\}$$

$$II \quad F_p(\varphi) = F_p \cdot e^{-(\mu \cdot \varphi + k_1 x)} \quad \{4.9\}$$

$$III \quad F_p(x) = F_p \cdot e^{-\mu(\varphi + \varphi_1 x_r)} \quad \{4.10a\}$$

$$IV \quad F_p(x) = F_p \cdot e^{-\mu(\varphi + \varphi_1 x)} \quad \{4.10b\}$$

Bij formule 4.10a is  $x_r$  gelijk aan de lengte van de gedeelte(n) met een recht kabelverloop van de voorspanstreng.

De Commissie voor Uitvoering van Research [5] heeft vervolgens een aantal laboratoriummetingen uitgevoerd bij VMA-strengen. Uit het onderzoek op 96 voorspanstrengen (metingen verricht op uitsluitend metalen omhulling) is gebleken dat formule 4.10b de beste benadering geeft van de wrijvingsverliezen voor voorspanstrengen met aanhechting.

De American Concrete Institute [c] heeft in de aanbeveling 318-05 aangegeven dat voor de bepaling van het wrijvingsverlies de formule 4.9 gebruikt moet worden. Daarnaast zijn coëfficiënten vastgelegd voor voorspanstrengen zonder aanhechting (Unbonded tendons pregreased):

$$\mu = 0.05 - 0.15$$

$$k_1 = 0.0010 - 0.0066 \text{ rad/m}$$

Door Bruggeling [7] wordt de formule 4.10b gebruikt met coëfficiënten vastgelegd voor voorspanstrengen zonder aanhechting:

$$\mu = 0.07 \text{ (gemiddelde waarde met een afwijking van 25% in de berekening)}$$

$$\varphi_1 = 0.01 \text{ rad/m}$$

De eerste literatuur over berekeningen van wrijvingsverliezen bij VZA-strengen is omschreven door Kamerling [9]. Citaat uit deze literatuur: “De verliezen van de wrijving kunnen worden bepaald op de gebruikelijke methode met de formule  $F_p(x) = F_p \cdot e^{-(\mu \cdot \varphi + k_1 x)}$ , waarbij voor  $\mu$  (wrijvingscoëfficiënt) een waarde tussen de 0.05 en 0.07 in rekening moet worden gebracht en voor  $k$  (lineaire wrijvingscoëfficiënt) van 0.003 en 0.004.”

In NEN 6720 [a] wordt ook de formule 4.10b gebruikt met coëfficiënten vastgelegd voor voorspanstrengen zonder aanhechting:

$$\mu = 0.05 - 0.10$$

$$\varphi_1 = 0.03 - 0.06 \text{ rad/m}$$

Conclusie van dit alles, is dat de basis van de berekeningen allemaal berusten op dezelfde berekening. De grootste verschillen zijn terug te vinden in de manier van het meenemen van de wrijvingscoëfficiënt en het Wobble-effect.

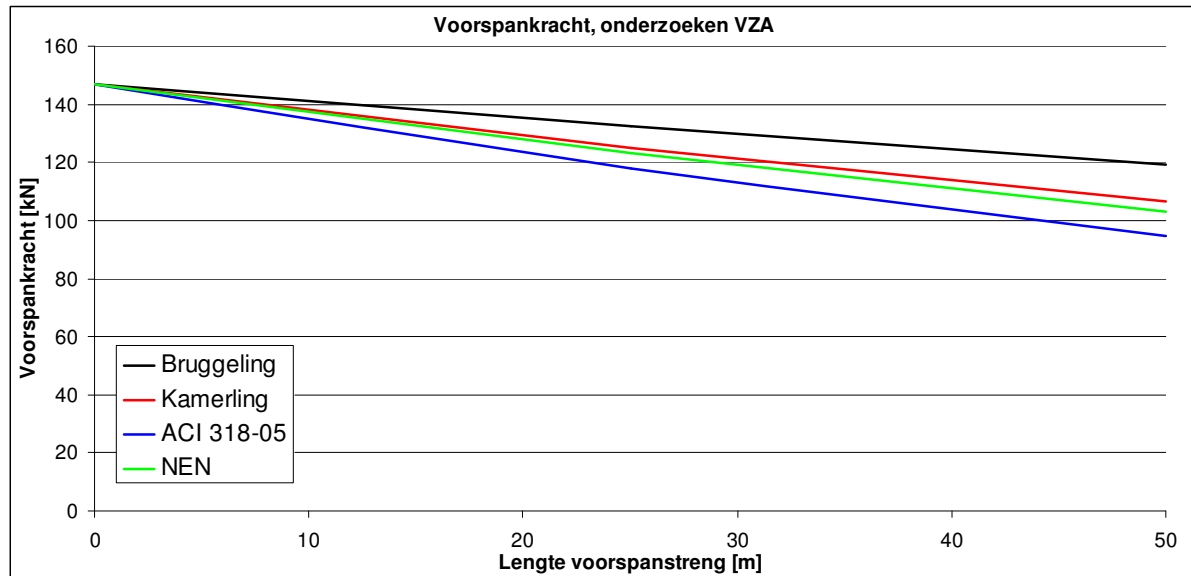
In tabel 4-2 zijn de verschillende resultaten van berekening met bijbehorende waarden voor wrijvingscoëfficiënt en Wobble-effect naast elkaar gezet.

Tabel 4-2 Onderzoeken naar wrijvingsverlies

Onderzoeker	Formule	VMA / VZA	Wrijvingscoëfficiënt	Wobble-effect [rad/m]
Cooley [1]	$F_p(x) = F_p \cdot e^{-(\mu \cdot \varphi + k_1 x)}$	VMA	-	-
Fritz [2]	$F_p(x) = F_p \cdot e^{-\mu \cdot \varphi}$	VMA	0.21 - 0.73	-
Dreux [3]	$F_p(x) = F_p \cdot e^{-(\mu \varphi + \varphi_1 x)}$	VMA	-	-
Knesch [4]	$F_p(x) = F_p \cdot e^{-\mu \cdot \varphi}$	VMA	0.256	-
CUR 30 [5]	$F_p(x) = F_p \cdot e^{-\mu(\varphi + \varphi_1 x)}$	VMA	0.26	0.10
Bruggeling [7]	$F_p(x) = F_p \cdot e^{-\mu(\varphi + \varphi_1 x)}$	VZA	0.07	0.010
Kamerling [9]	$F_p(x) = F_p \cdot e^{-(\mu \cdot \varphi + k_1 x)}$	VZA	0.05 - 0.07	0.003 - 0.004
ACI 318-05 [c]	$F_p(x) = F_p \cdot e^{-(\mu \cdot \varphi + k_1 x)}$	VZA	0.05 - 0.15	0.0010 - 0.0066
NEN [a]	$F_p(x) = F_p \cdot e^{-\mu(\varphi + \varphi_1 x)}$	VZA	0.05 - 0.10	0.03 - 0.06

De resultaten van de onderzoeken verricht naar VZA-strengen kunnen ook uitgezet worden in een grafiek. De resultaten zijn weergegeven in figuur 4.17.

Uit de grafiek is op te maken dat de onderzoeken van Bruggeling en Kamerling minder wrijvingsverlies hebben in dit specifieke geval.



Figuur 4.17 Voorspankracht verschillende onderzoeken

### 4.5.3. Normering

In NEN 6720, artikel 4.1.4.5. staat het volgende omschreven ten aanzien van de bepaling van de wrijvingsverliezen:

De na het spannen op het voorspanstaal overgebrachte kracht ( $F_{po}$ ) is de door de spanvijzel uitgeoefende kracht (bruto-voorspankracht  $F_{pbr}$ ) verminderd met het wrijvingsverlies in de verankering. Een veel gebruikte formule voor de berekening van de verliezen  $\Delta F_p$  ten gevolge van de wrijving in de spankanalen in een doorsnede op een afstand  $x$  van de spanzijde is:

$$\Delta F_p = F_{po} \cdot \left(1 - e^{-\mu(\phi + \phi_1 x)}\right) \quad \{4.11\}$$

hierin is:  $\mu$  = wrijvingscoëfficiënt tussen kabel en omhulling;  
 $\phi$  = som van de absolute waarden van de opeenvolgende richtingsveranderingen van het spanelement over de afstand  $x$ ;  
 $\phi_1$  = coëfficiënt voor de "Wobble";

Indien  $\mu(\phi + \phi_1 x) \leq 0,30$ , kan bovenstaande formule ook in lineaire vorm worden geschreven:

$$\Delta F_p = F_{po} \cdot \mu(\phi + \phi_1 x) \quad \{4.12\}$$

Waarden voor  $\mu$  en  $\phi_1$  kunnen worden ontleend aan attesten van voorspansystemen. Ter indicatie gelden de volgende waarden:

Omholde strengen	$\mu$	= 0.05 – 0.10
	$\phi_1$	= 0.03 – 0.06
Blank voorspanstaal	$\mu$	= 0.15 – 0.20 (mono-systeem)
	$\phi$	= 0.13 – 0.26 (multi-systeem)
	$\phi_1$	= 0.03 – 0.06 (mono- en multi-systeem)

Zoals staat omschreven in de norm moeten de waarden van  $\mu$  en  $\Phi_1$  worden ontleend aan een attest. Er bestaat geen aparte attest voor alleen voorspanstrengen. In de attest-met-productcertificaat K7201, Verankering van een zevendraadsvoorspanstreng [16] staat geschreven dat:

De berekening van de wrijvingsverliezen dient te geschieden overeenkomstig NEN 6720 artikel 4.1.4.5, waarbij uitgegaan dient te worden van in de tabel 4-3 genoemde coëfficiënten voor wrijving en Wobble-effect. De wrijvingsfactor is afhankelijk van de oppervlaktetoestand van het voorspanstaal en de wand van het spankanaal. Het Wobble-effect wordt bepaald door de nauwkeurigheid in de ligging van de spankanalen. Het totale effect van deze twee factoren dient met de fabrikant in het werk te worden vastgesteld en te worden geverifieerd aan de voor de berekening vastgestelde waarden.”

Tabel 4-3 Coëfficiënten voor wrijvingscoëfficiënt en Wobble-effect

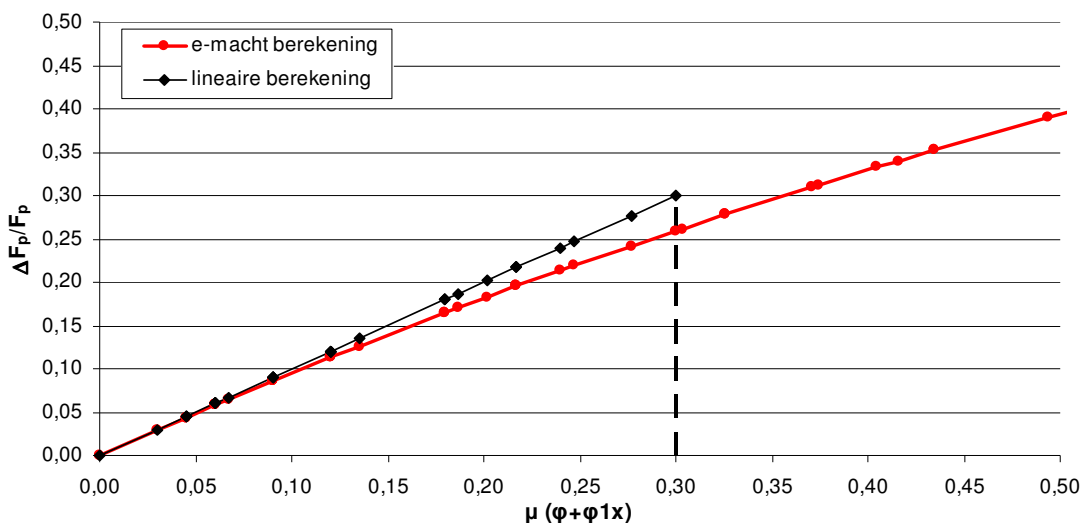
	VZA-SYSTEEM	VMA-SYSTEEM
Wrijvingscoëfficiënt	0.05 – 0.10	0.15 – 0.20
Coëfficiënt voor het Wobble-effect in rad/m	0.03 – 0.06	0.005 – 0.010

Het attest geeft geen ander advies of eis ten aanzien van de bepaling van de wrijvingsverliezen ten opzichte van de norm (NEN 6720, art. 4.1.4.5.). Alleen de coëfficiënt voor het Wobble-effect bij VMA-systemen zijn verlaagd, maar dit valt buiten het onderzoek. Vergelijkbare attesten zijn ook bekeken en geven hetzelfde beeld: geen afwijking tussen normering en attest.

#### 4.5.3.1. Invloed afrondingseis normering

In de norm is een regel opgenomen die aangeeft dat indien  $\mu(\phi + \phi_1 x) \leq 0,30$ , de formule  $\Delta F_p = F_{po} \cdot (1 - e^{-\mu(\phi + \phi_1 x)})$  in lineaire vorm kan worden geschreven als  $\Delta F_p = F_{po} \cdot \mu(\phi + \phi_1 x)$ . De afronding kan van invloed zijn op de resultaten van de wrijvingsverliezen.

In figuur 4.18 zijn beide berekeningen uitgezet. De afwijking neemt toe naarmate  $\mu(\phi + \phi_1 x)$  groter wordt.



Figuur 4.18 Relatie tussen lineaire en e-macht berekening



Voorbeeldberekening, aanname  $F_p = 147$  kN:

$$\text{Lineair: } \Delta F_p = 147 \cdot 0,30 = 44 \text{ kN}$$

$$\text{E-macht: } \Delta F_p = 147 \cdot (1 - e^{-0,30}) = 38 \text{ kN}$$

De afwijking bij  $\mu(\phi + \phi_1 x) \leq 0,30$  is afgerond maximaal 16%  $\left(\frac{44/147}{38/147}\right)$ , bij  $\mu(\phi + \phi_1 x) = 0,30$ .

De wrijving kan bij voorspanstrengen zonder aanhechting en een kabellengte tot 50 meter worden berekend met de lineaire berekening. Bij langere kabels komt de waarde voor  $\mu(\phi + \phi_1 x)$  al snel boven de grenswaarde van 0,30 uit en moet altijd gerekend worden met de formule met e-machtfunctie.

#### 4.5.4. Fabrikanten

Elke fabrikant onderwerpt zijn voorspanstrengen aan een aantal kwaliteitseisen. Deze komen tot stand volgens de in de norm gehanteerde eisen. In Nederland is deze norm de NEN 3868 (Voorspanstaal) en in België de NBN I 10-003 (Voorspanstaal – Strengen).

Een fabrikant meet bij de voorspanstreng niet een waarde voor de wrijvingscoëfficiënt en het Wobble-effect. Een aantal kwaliteitseisen kunnen wel van invloed zijn op het wrijvingsverlies.

De mogelijke kwaliteitseisen die een invloed kunnen hebben op het wrijvingsverlies zijn terug te vinden in tabel 4-4.

Tabel 4-4 Kwaliteitseisen die van invloed kunnen zijn op het wrijvingsverlies

Eis	minimaal	maximaal
Pijl	-	ja
Slaglengte	ja	ja
Wanddikte	ja	ja
Schuifkracht	-	ja
Vetgehalte	ja	ja

In NEN 3868 (art. 5.2.2.1) staat het volgende omschreven ten aanzien van deze eisen:

- Pijl: Het voorspandraad moet zo zijn geleverd dat het gemakkelijk kan worden afgewikkeld. Van een willekeurige lengte draad, vrij neergelegd op een effen en glad oppervlak, mag de hoogte (pijl) van de boog tot een koorde van 1 m lengte, gemeten aan de binnenzijde van de boog, ten hoogste 25 mm bedragen

In NEN 3868 (art. 5.3.1.4) staat het volgende omschreven ten aanzien van deze eisen:

- Slaglengte: De slaglengte van 7-draadsstrengen moet liggen tussen 12 maal en 18 maal de kenmiddellijn van de streng

In NEN 3868 (art. 5.3.1.12) staat het volgende omschreven ten aanzien van deze eisen:

- Wanddikte: “de omhulling moet ononderbroken en zonder perforaties over de gehele lengte van de streng aanwezig zijn” en “de slagrichting van de streng mag niet aan de buitenzijde van de omhulling zichtbaar zijn”.
- Schuifkracht: “de kracht benodigd om een recht stuk omhulling met een lengte van 1 meter ten opzichte van de streng te verschuiven mag bij een temperatuur van  $(20 \pm 2)$  °C ten hoogste 60 N bedragen”.
- Vetgehalte: alleen eigenschappen van het vet zijn omschreven.

## 4.6. Conclusie literatuur

Uit de literatuurstudie naar de berekening van de wrijvingsverliezen is naar voren gekomen dat alle berekeningen gebaseerd zijn op dezelfde modellering van de voorspanstreng. Dit telt voor zowel de voorspanstrengen met aanhechting als de voorspanstrengen zonder aanhechting.

Daarnaast zijn er verschillende opvattingen over hoe het Wobble-effect meegenomen moet worden in de berekeningen naar de wrijvingsverliezen. Er zijn verschillende formules bepaald en de vaste waarde voor wrijvingscoëfficiënt en Wobble-effect varieert bij veel onderzoeken.

Er is geen eenduidige manier voor de berekening van de wrijving bij voorspanstrengen zonder aanhechting. Daarom zijn er een aantal vragen naar voren gekomen die beantwoord moeten worden:

- kan de modellering van de voorspanstreng, zoals deze gebruikt wordt bij voorspanstrengen met aanhechting, wel worden overgenomen voor de berekening van de verliezen bij VZA- strengen?
- wat is een realistische waarde voor de wrijvingscoëfficiënt bij VZA- strengen?
- hoe moet het Wobble-effect worden meegenomen bij VZA-strengen?
- wat is een realistische waarde voor het Wobble-effect bij VZA- strengen?

## 5. Wrijvingscoëfficiënt

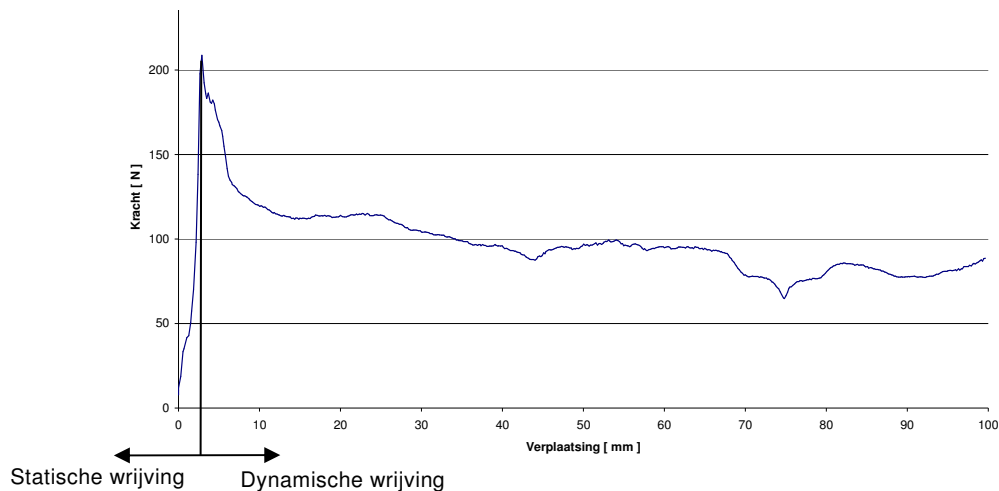
### 5.1. Inleiding

De wrijvingscoëfficiënt is een dimensieloos getal dat de mate van wrijving tussen twee oppervlakken aangeeft. Er is een onderscheid tussen statische en dynamische wrijvingscoëfficiënt [29].

De statische wrijvingscoëfficiënt is een verhouding tussen de maximaal optredende wrijvingskracht en de normaalkracht, voordat de oppervlakken ten opzichte van elkaar gaan bewegen.

De dynamische wrijvingscoëfficiënt is de verhouding tussen de wrijvingskracht en de normaalkracht als de oppervlakken ten opzichte van elkaar bewegen.

In figuur 5.1 is het karakteristieke verloop van de verplaatsing en kracht bij een wrijvingsmeting weergegeven.



Figuur 5.1 Karakteristiek verloop van verplaatsing en kracht bij wrijvingsmeting

In de grafiek zijn duidelijk twee trajecten te onderscheiden.

01. In het eerste traject neemt de kracht toe, terwijl er nauwelijks verplaatsing optreedt. Tot het punt waar de maximale kracht bereikt wordt, ontstaat statische wrijving.
02. Bij het tweede traject neemt de verplaatsing toe terwijl de kracht constant blijft. Dit deel heet de dynamische of kinetische wrijving. Bij het op kracht brengen van de voorspanstreng in de praktijk is de dynamische wrijving van belang.

### 5.2. Meetmethoden

#### 5.2.1. Algemene meetmethoden

Een wrijvingscoëfficiënt kan alleen door experimenteel onderzoek worden bepaald.

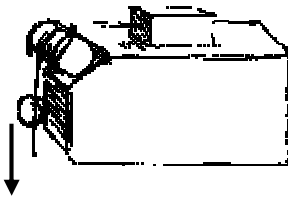
In de volgende paragrafen wordt een korte uitleg gegeven over de mogelijke meetmethoden om de wrijvingscoëfficiënt te bepalen.

### 5.2.1.1. Massaverhouding

Een meetmethode voor het bepalen van de wrijvingscoëfficiënt is de methode met massaverhouding. Aan een koord, die met behulp van een katrol is bevestigd aan een blokje, wordt een massa gehangen.

Op het moment van glijden volgt de wrijvingscoëfficiënt uit de verhouding tussen de massa die aan het koord hangt (trekkracht) en de massa van het blokje (normaalkracht). Hieruit volgt alleen de statische wrijvingscoëfficiënt.

Een schematische weergave van de meetopstelling is weergegeven in figuur 5.2.



Figuur 5.2 Proefopstelling massaverhouding

### 5.2.1.2. Veerunster

Een andere methode voor het bepalen van de wrijvingscoëfficiënt is deze waarbij gebruik gemaakt wordt van een veerunster. Door een trekkracht op de veerunster, die verbonden is met een blokje, uit te oefenen, kan de kracht worden gemeten die nodig is om het blokje te laten glijden. De verhouding tussen de trekkracht en de massa van het blokje (normaalkracht) levert de wrijvingscoëfficiënt. Hieruit volgt ook alleen de statisch wrijvingscoëfficiënt.

De opstelling van de veerunster is weergegeven in figuur 5.3



Figuur 5.3 Proefopstelling veerunster

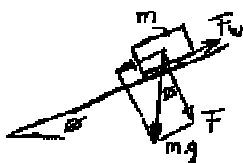
### 5.2.1.3. Wrijvingshoek

Bij de derde methode wordt gebruik gemaakt van een hellend vlak.

Een blokje wordt op een hellend vlak geplaatst en de hellingshoek wordt vergroot. Wanneer het blokje begint te glijden, kan de hellingshoek worden bepaald. De tangens die zo wordt gevonden is de zogenaamde 'wrijvingshoek'. De hoek is gerelateerd aan de wrijvingscoëfficiënt

( $\mu = \tan \phi = \frac{F_w}{F}$ ). Hieruit volgt ook alleen de statische wrijvingscoëfficiënt.

In figuur 5.4 is een schematisering te zien van de wrijvingshoekmeting.



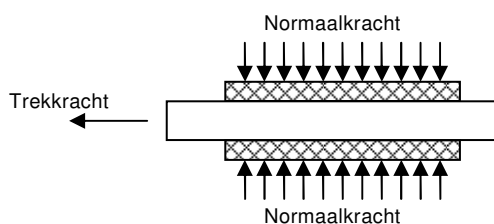
Figuur 5.4 Proefopstelling wrijvingshoek

#### 5.2.1.4. Kleminrichting

Kleminrichting is een andere methode voor het bepalen van de wrijvingscoëfficiënt. Het proefstuk worden ingeklemd tussen twee daarbij passende oppervlakken. De kracht die nodig is om het proefstuk in beweging te krijgen, moet worden gehalveerd om de wrijvingskracht te bepalen, dit vanwege de twee wrijvingsvlakken. De verhouding tussen de trekkracht en de normaalkracht geeft de uiteindelijke wrijvingscoëfficiënt. De methode met kleminrichting is geschikt voor het bepalen van de statische en dynamische wrijvingscoëfficiënt.

De kleminrichting wordt voornamelijk gebruikt voor oppervlakken waarbij hoge contactdruk een rol speelt.

In figuur 5.5 is een schematische weergave te zien van de kleminrichting.



Figuur 5.5 Proefopstelling kleminrichting

#### 5.2.2. Meetmethode fabrikant

Een fabrikant van de voorspanstreng bepaalt geen wrijvingscoëfficiënt. De voorspanstreng moet voldoen aan een aantal eisen die zijn vastgesteld in de Nederlandse norm (NEN 3868). In de norm staat ook een eis ten aanzien van de schuifkracht.

De werkschrijving van Nedri Nederland voor de bepaling van de schuifkracht is als volgt omschreven:

De schuifkracht is de kracht die nodig is om de omhulling met een lengte van 1 meter t.o.v. de voorspanstreng te verschuiven (bij een temperatuur van  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ). De schuifkracht wordt gemeten met behulp van een weegschaal.

Monstervoorbereiding:

- Kort het monster eventueel in tot minimaal 1.1 m;
- Ontbraam de omhulling aan één zijde;
- Snijdt aan de andere zijde de omhulling af op 1000 mm ( $\pm 2$  mm).

Uitvoering van de meting:

- Plaats de voorspanstreng met het niet omhulde deel op de weegschaal en lees het gewicht af;
- Neem de voorspanstreng bij de omhulling vast en oefen, langzaam opbouwend, een neerwaartse kracht uit. Zodra de omhulling begint te schuiven, dient de kracht (in kgf tot 1 decimaal achter de komma) afgelezen te worden;
- De schuifkracht (kgf) is de totale kracht verminderd met het gewicht van de voorspanstreng;
- Vermenigvuldig dit getal met 10 om de kracht in [Newton] uit te drukken.

## 6. Metingen laboratorium

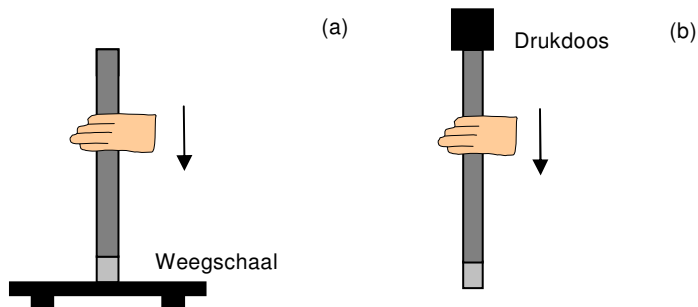
### 6.1. Algemene informatie

Om meer te weten te komen over de wrijvingscoëfficiënt van de VZA-strengen en de bepaling hiervan, is eerst gekeken of en hoe deze wrijvingscoëfficiënt op dit moment wordt bepaald.

Om te onderzoeken of de metingen van de schuifkracht gebruikt kunnen worden voor het bepalen van de wrijving, zijn een aantal oriënterende metingen uitgevoerd in het laboratorium van de TU/e. In paragraaf 5.2.2 is uitleg gegeven over de manier van beproeven van de schuifkracht met behulp van een weegschaal. De manier van meten en registreren met een weegschaal is onnauwkeurig (aflezen met een nauwkeurigheid van  $0.5 \text{ kg} = 5 \text{ N}$  en range van  $0 \text{ kg}$  tot  $130 \text{ kg}$ ), daarom is de weegschaal vervangen door een drukdoos waaraan de voorspanstreng is opgehangen. Dit levert drie voordelen:

01. drukdoos is nauwkeuriger (nauwkeurigheid van  $0.01 \text{ N}$  en range van  $0 \text{ N}$  tot  $250 \text{ N}$ );
02. resultaten kunnen over de gehele verplaatsing tussen omhulling en voorspanstreng worden geregistreerd;
03. het gewicht van de voorspanstreng is al in de meting verdisconteerd.

In figuur 6.1 zijn de twee verschillende metingen schematisch weergegeven.



Figuur 6.1 Meting fabrikant (a) / Meting laboratorium (b)

Tijdens de oriënterende meting bleek dat het meten met een voorspanstreng bevestigd aan de drukdoos niet voldeed, sommige variabelen waren niet vastgelegd:

- a. De verplaatsingssnelheid leek, tijdens de oriënterende metingen, van essentieel belang te zijn. Bij een langzame verplaatsingssnelheid was de benodigde statische en dynamische wrijving lager dan bij een hogere snelheid. Daarmee zou de verplaatsingssnelheid van invloed zijn op het uiteindelijke resultaat van de wrijvingscoëfficiënt.
- b. De normaalkracht die op de voorspanstreng was aangebracht, door het vasthouden met de hand, was niet te meten.

Voor de bepaling van de wrijvingscoëfficiënt moet de trekkracht en normaalkracht bekend zijn. Bij de schuifkrachtmeting wordt de normaalkracht niet gemeten en is dus niet te gebruiken voor de bepaling van de wrijvingscoëfficiënt.

## 6.2. Proefopstelling

Voor uitwerking van de proefopstelling zijn eerst een aantal vragen beantwoord:

1. Welke meetmethode wordt gebruikt voor de bepaling van de wrijvingscoëfficiënt?
2. Hoe kan de proefopzet de praktijk benaderen?
3. Welke parameters spelen een rol bij de metingen?

### 1. Meetmethode

Voor de metingen naar de wrijvingscoëfficiënt is zowel de statische als de dynamische wrijvingscoëfficiënt van belang. De methode van massaverhouding, veerunster en wrijvingshoek vallen af, omdat bij deze meetmethoden alleen de statische wrijvingscoëfficiënt gemeten kan worden. De methode van klemrichting kan wel worden gebruikt voor het bepalen van de statische en de dynamische wrijvingscoëfficiënt en wordt verder gebruikt voor de bepaling van de wrijvingscoëfficiënt.

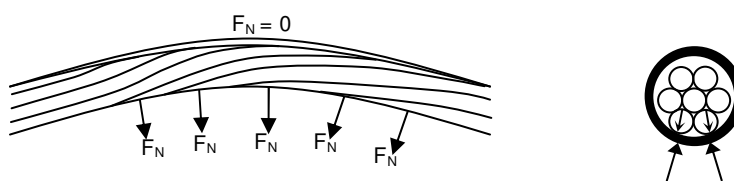
### 2. Benadering praktijk

Voor een juiste proefopzet is het van belang dat de praktijk goed wordt benaderd. Eerst is gekeken welke krachten optreden tijdens het spannen van de in praktijk toegepaste voorspanstrengen.

Voor een optimaal gebruik van de voorspanning is het verloop van een voorspanstreng gelijk aan het verloop van de momentenlijn. Hierdoor ontstaan krommingen in de voorspanstreng.

Bij gekromde voorspanstrengen, zoals deze in de praktijk worden toegepast, ontstaat een verschil in normaalkracht aan boven- en onderzijde van de voorspanstreng. De streng wordt tegen de buitenzijde getrokken. Hierdoor ontstaat aan de bovenzijde een normaalkracht van nul, terwijl aan de onderzijde wel een normaalkracht optreedt.

In figuur 6.2 zijn de optredende normaalkrachten weergegeven.

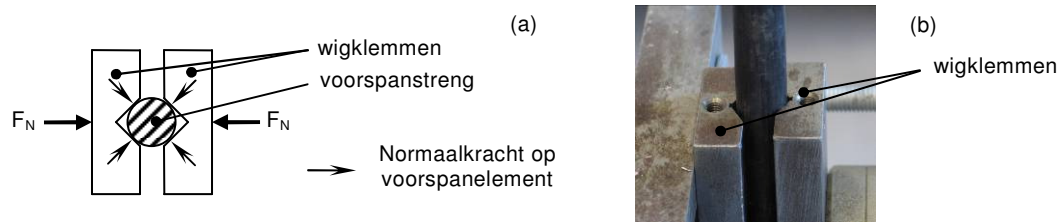


Figuur 6.2 Optredende normaalkracht bij gekromde voorspanstreng

In de laboratoriummeting is het niet goed mogelijk een proefopstelling te maken waarbij de optredende normaalkracht gelijk is als in de praktijk. Om nu toch een meting te kunnen uitvoeren, is een andere benadering voor het aanbrengen van de normaalkracht uitgewerkt.

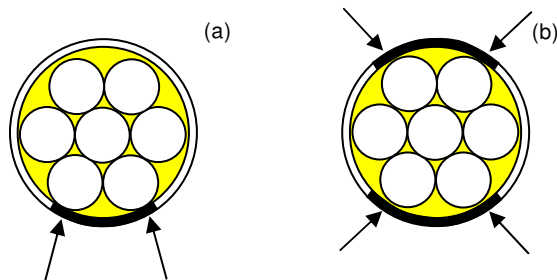
Bij de meting in het laboratorium wordt een normaalkracht aangebracht op de voorspanstreng met behulp van wigklemmen. De wigklemmen brengen een kracht loodrecht gericht op de voorspanstreng aan, waarbij de normaalkracht op vier punten aangrijpt.

In figuur 6.3 is een doorsnede te zien van de wigklemmen met de bijbehorende plaatsen waar de normaalkracht aangrijpt.



Figuur 6.3 Dwarsdoorsnede wigklemmen laboratoriummeting (a) / Wigklemmen bij meetopstelling (b)

De aanname die hierbij gesteld is, is dat het oppervlak waarover de normaalkracht invloed (over een lengte van 155 mm) uitoefent bij de laboratoriumproeven, tweemaal zo groot is als bij gekromde voerspanstrengen in de praktijk (zie Figuur 6.4).



Figuur 6.4 Invloedsgebied normaalkracht praktijk (a) / laboratorium (b)

In de formule voor de bepaling van de wrijvingscoëfficiënt moet het verschil van normaalkracht, tussen praktijk en laboratorium, worden verdisconteerd. Door de trekkracht door een factor twee (tweezijdig aanbrengen van normaalkracht, terwijl wrijvingscoëfficiënt de verhouding is bij eenzijdig wrijvingsoppervlak) te delen, is deze invloed verwerkt:

$$\mu = \frac{F}{2F_N}$$

waarbij:  $F$  = trekkracht [N]  
 $F_N$  = normaalkracht [N]

### 3. Parameters

Als parameters is bij de proefopstelling gekeken naar:

01. eigenschappen voerspanstreng;
02. diameter van de voerspanstreng;
03. snelheid van het trekken;
04. normaalkracht op de voerspanstreng;
05. rotatievrijheid van de spanvijzel.

De parameters 01 t/m 02 kunnen vrij eenvoudig worden bepaald.

Eigenschappen van de voerspanstreng (ruwheid, slaglengte) zijn reeds bekend en diameter wordt opgemeten.

De parameters 03 t/m 05 zijn als volgt:

03. Om de snelheid van het trekken constant te houden (om zo een gelijke situatie te hebben als tijdens spannen in de praktijk), wordt een verplaatsingsgestuurde vijzel met een slaglengte van 100 mm gebruikt;
04. De normaalkracht wordt gemeten met behulp van een drukdoos;



05. Bij het spannen van de voorspanstrengen blijkt de vijzel te roteren. Deze rotatie zou mogelijk een invloed kunnen zijn op de wrijving. Bij de metingen zal de rotatievrijheid van het spanvijzel visueel worden beoordeeld. De visuele beoordeling is alleen van toepassing indien rotatie niet op voorhand wordt verhinderd.

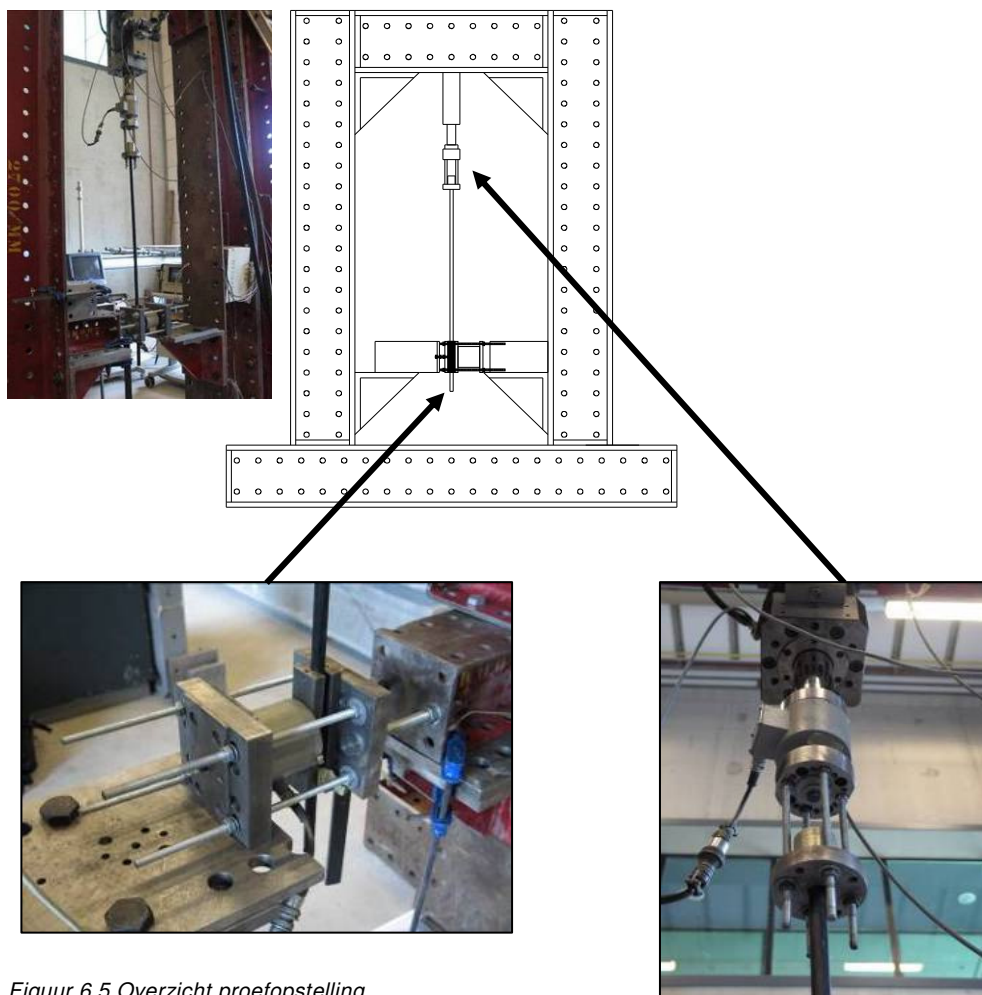
Samenvattend kan de proefopstelling conform de volgende punten worden opgebouwd:

01. Verplaatsingssnelheid met een verplaatsingsgestuurde vijzel;
02. Normaalkracht aanbrengen met behulp van wigklemmen;
03. Trekkkracht en normaalkracht worden gemeten met behulp van een drukdoos;
04. Eigen gewicht van voorspanstreng reeds verdisconteerd voor de meting (na het plaatsen van de voorspanstreng wordt de drukdoos op 0 N gezet).

De uiteindelijke proefopstelling is weergegeven in figuur 6.5.

Aan de bovenzijde zijn de verplaatsingsgestuurde vijzel en de drukdoos, ten behoeve van de trekkkracht, te zien.

Aan de onderzijde zijn de wigklemmen vastgemaakt aan de drukdoos en het frame. Door het aandraaien van vier draadeinden, ter plaatse van de wigklemmen, kan een vastgestelde normaalkracht worden aangebracht op de voorspanstreng over een totale lengte van 155 mm.



Figuur 6.5 Overzicht proefopstelling

## 6.2.1. Correctie proefopstelling

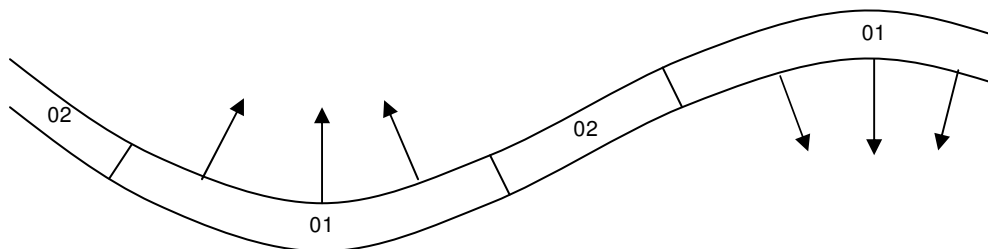
Bij de metingen is gekozen om de omhulling over de volledige lengte (variërend van 716 tot 785 mm) van de voorspanstreng in tact te laten, waarbij de normaalkracht niet over de gehele omhulling aangebracht is. Tijdens de analyse van de metingen is nogmaals gekeken naar de definitie van de wrijvingscoëfficiënt. Hieruit was op te maken dat de invloed van de omhulling, waar geen normaalkracht op uitgeoefend werd, misschien een invloed te zijn op de totale wrijving.

Om te onderzoeken wat de mogelijke invloed hiervan is, zijn er nog een aantal metingen verricht. Voorafgaand aan de metingen is gekeken welke verschillende situaties ontstaan bij het spannen van de gekromde voorspanstreng in de praktijk.

De optredende normaalkracht bij gekromde voorspanstrengen, toegepast in de praktijk, is op te splitsen in twee delen:

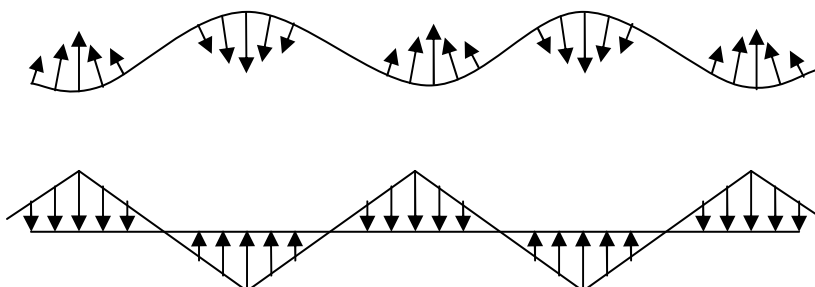
01. Bij kromming in de voorspanstreng ontstaat een op- of neerwaartse druk. Hierdoor treedt normaalkracht op;
02. Bij geen kromming in de voorspanstreng treedt geen normaalkracht op.

In figuur 6.6 is weergegeven welke situatie optreedt in een gekromde voorspanstreng.



Figuur 6.6 Situatie wrijvingscoëfficiënt praktijk

In figuur 6.7 is de optredende normaalkracht weergegeven zoals deze in de praktijksituatie bij gekromde elementen optreedt.

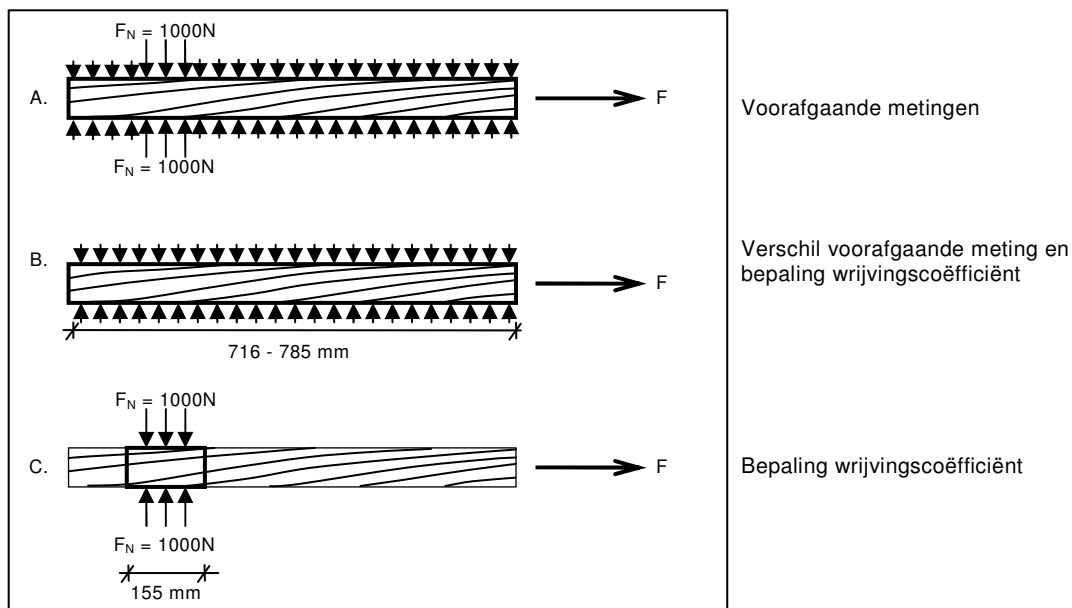


Figuur 6.7 Optredende normaalkracht praktijksituatie

In feite zijn er drie situaties (zie

figuur 6.8) die onderzocht moeten worden om te kunnen beoordelen of de voorafgaande metingen realistisch zijn voor de bepaling van de wrijvingscoëfficiënt:

- A. Voorspanstreng voorzien van 1000 N normaalkracht en omhulling over volledige voorspanstreng aangebracht (situatie zoals in voorafgaande metingen beproefd);
- B. Voorspanstreng voorzien van minimale normaalkracht en omhulling over volledige voorspanstreng aangebracht (treedt op waar kromming gelijk is aan nul);
- C. Voorspanstreng voorzien van 1000 N normaalkracht en omhulling alleen over een lengte van 155 mm (lengte wigklemmen) aangebracht (treedt op waar de kromming maximaal is).



Figuur 6.8 Proefopstellingen aanbrengen normaalkracht

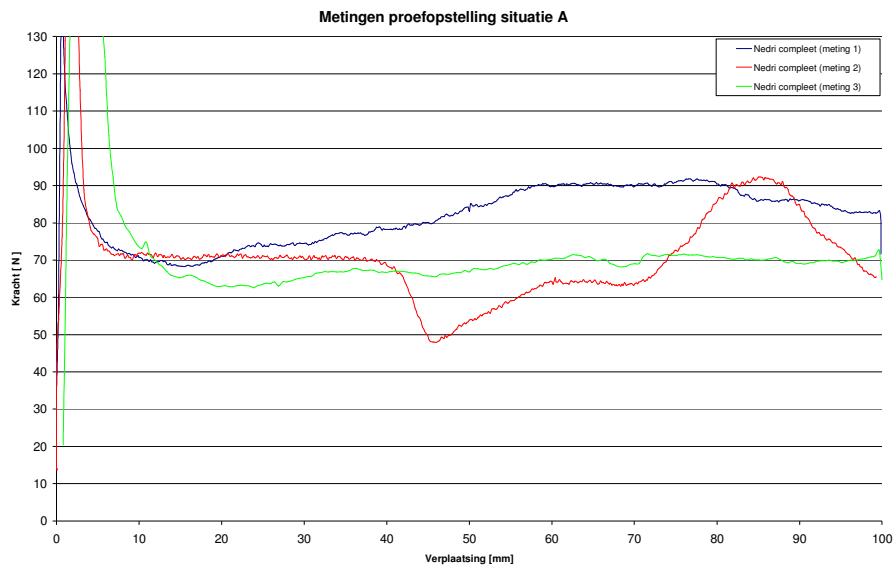
De onderstaande twee criteria moeten worden vastgesteld:

01. Is er een wezenlijk verschil tussen de verschillende situaties A, B en C?
02. Hoe kan het mogelijke verschil worden verwerkt in voorafgaande metingen?

Van elke situatie zijn drie metingen uitgevoerd. Bij alle negen de metingen zijn de parameters 01 t/m 05 gelijk gehouden:

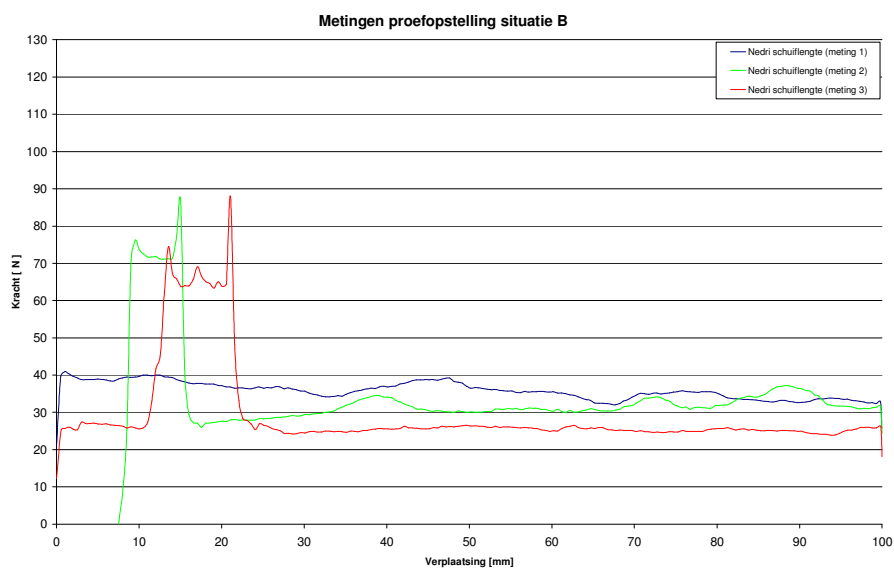
01. Fabrikant = Nedri;
02. Diameter = 12.9 mm;
03. Verplaatsingssnelheid = 100 mm/min;
04. Aangebrachte normaalkracht = 1000 N  
(de minimale normaalkracht, aangebracht bij situatie B, is afhankelijk van de wrijving tussen wigklem en omhulling);
05. Rotatie = vrij mogelijk.

In figuur 6.9 zijn de resultaten weergegeven van situatie A.



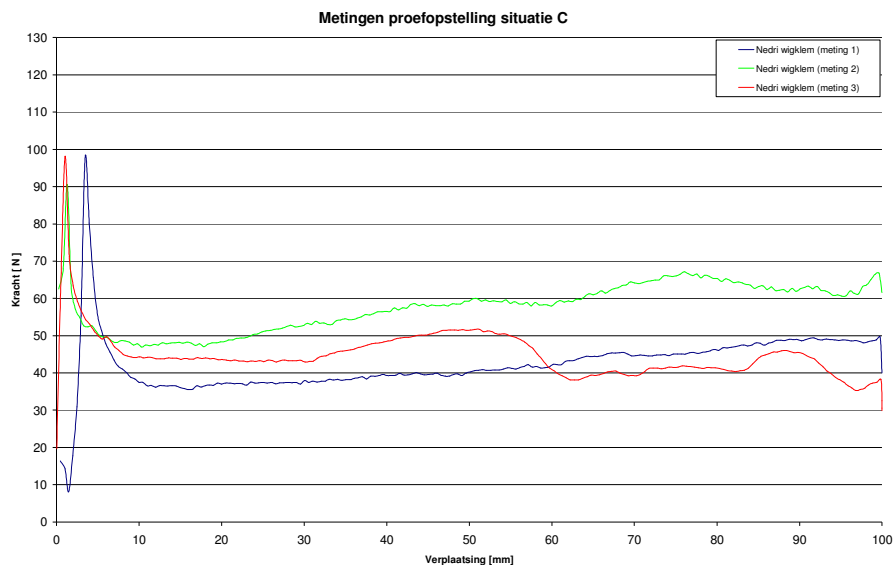
Figuur 6.9 Metingen trekkracht situatie A (normaalkracht en schuifkracht)

In figuur 6.10 zijn de resultaten weergegeven van situatie B.



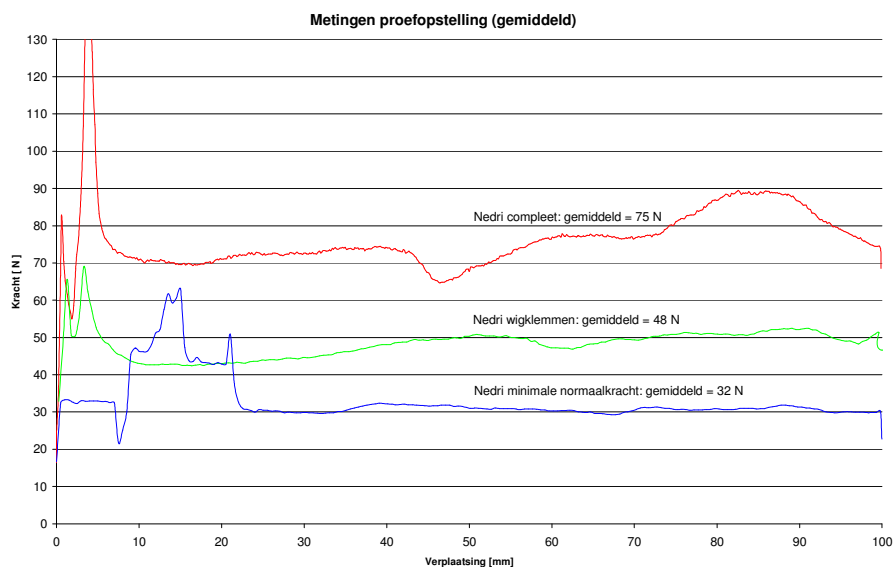
Figuur 6.10 Metingen trekkracht situatie B (schuifkracht)

In figuur 6.11 zijn de resultaten weergegeven van situatie C.



Figuur 6.11 Metingen trekkracht situatie C (normaalkracht)

Van alle metingen van elke situatie zijn de gemiddelde waarden bepaald. De gemiddelde waarden zijn uitgezet in figuur 6.12.



Figuur 6.12 Gemiddelde waarden toetsing proefopstelling

Uit de metingen is gebleken dat situatie A (normaalkracht aangebracht over 155 mm en omhulling over volledige voorspanstreng aanwezig) een optelling is van situatie B (omhulling over volledige lengte van de voorspanstreng aanwezig en geen normaalkracht) en situatie C (normaalkracht aangebracht en omhulling aanwezig over een lengte van 155 mm).

Zoals al uitgelegd, treedt afhankelijk van de kromming van de voorspanstreng situatie B of situatie C op. De wrijvingscoëfficiënt van situatie B is kleiner dan van situatie C. Beide situaties treden niet tegelijkertijd op. Het is moeilijk in te schatten welke situatie waar in het kabelverloop zal optreden. Door over de volledige voorspanstreng de gecorrigeerde waarde aan te houden, ontstaat een overschatting van de optredende wrijving. Wel wordt zo voorkomen dat de wrijving te laag wordt ingeschat.

Dit betekent dat door van de voorafgaande metingen (situatie A) de wrijvingscoëfficiënt van situatie B af te trekken, de wrijvingscoëfficiënt van situatie C kan worden bepaald.

## 6.3. Resultaten

In de volgende paragrafen is steeds één van de parameters, zoals besproken in paragraaf 6.2 gevarieerd. De correctie, beschreven in paragraaf 6.2.1, zijn bij de resultaten nog niet verrekend.

### 6.3.1. Eigenschappen voorspanstreng

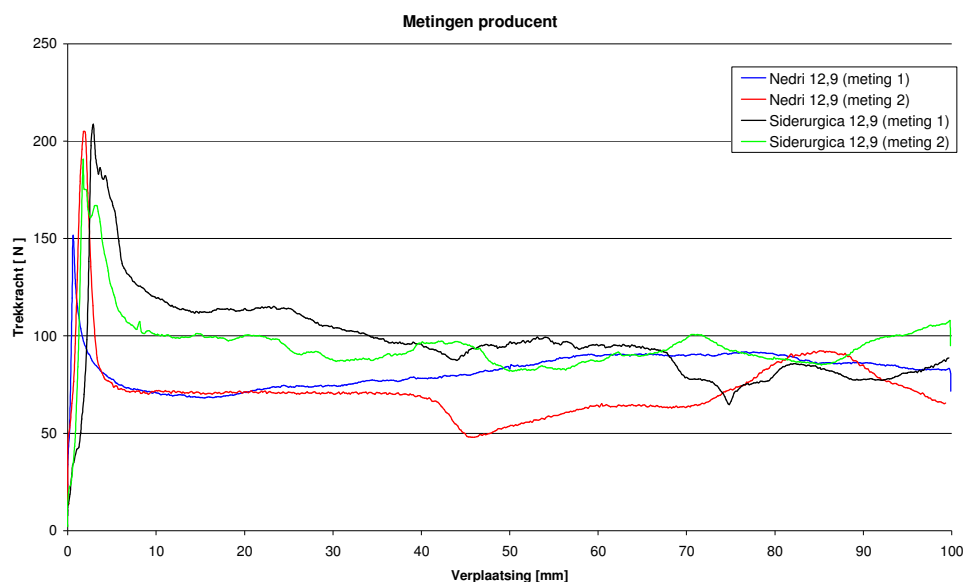
Bij de eerste meting is parameter 01 (eigenschappen voorspanstreng) onderzocht. De overige parameters zijn bij de metingen gelijk gehouden:

02. diameter = 12.9 mm
03. verplaatsingssnelheid = 100 mm/min
04. aangebrachte normaalkracht = 1000 N
05. rotatie = vrij mogelijk.

Er zijn voorspanstrengen van twee fabrikanten onderzocht: Nedri en Siderurgica. De volgende gemiddelde waarden zijn gemeten voor de trekkracht:

Voorspanstreng van fabrikant	Gemiddelde trekkracht
Nedri	76 N
Siderurgica	96 N

De metingen van de trekkracht ten aanzien van parameter 01, eigenschappen fabrikant, zijn in figuur 6.13 uitgezet.



Figuur 6.13 Metingen trekkracht fabrikant

Er is weinig verschil in wrijvingscoëfficiënt ten aanzien van de eigenschappen van de voorspanstreng. De onderzochte eigenschappen hebben weinig invloed op de wrijvingscoëfficiënt.

### 6.3.2. Diameter

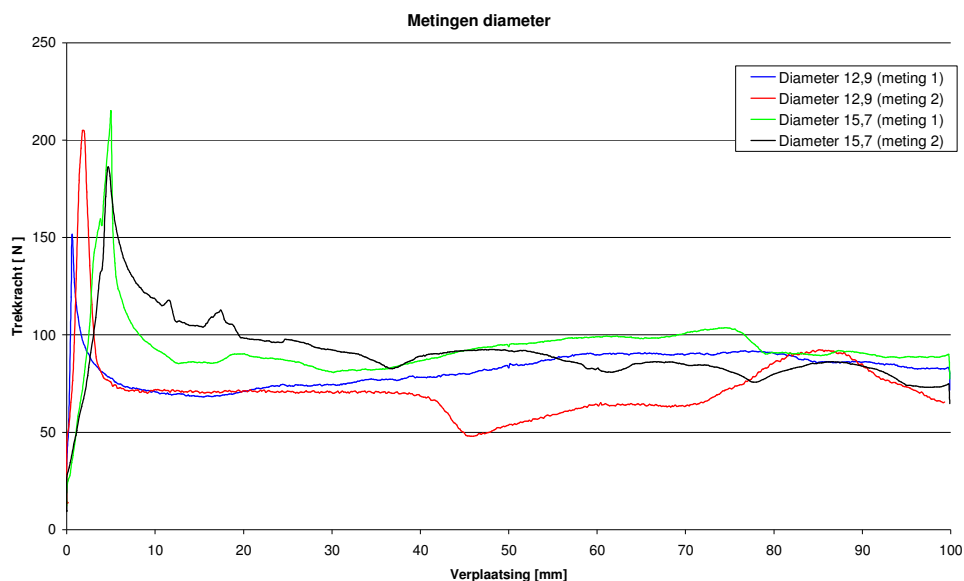
Bij de tweede meting is parameter 02 (diameter voorspanstreng) onderzocht. De overige parameters zijn bij de metingen gelijk gehouden:

01. fabrikant = Nedri
03. verplaatsingssnelheid = 100 mm/min
04. aangebrachte normaalkracht = 1000 N
05. rotatie = vrij mogelijk

Er zijn twee diameters onderzocht, te weten 12.9 mm en 15.7 mm. De correctie, beschreven in paragraaf 6.2.1, zijn bij de resultaten nog niet verrekend. De volgende gemiddelde waarden zijn gemeten voor de trekkracht:

Diameter [mm]	Gemiddelde trekkracht
12.9	76 N
15.7	92 N

De metingen van de trekkracht ten aanzien van parameter 02, diameter voorspanstreng, zijn in figuur 6.14 uitgezet.



Figuur 6.14 Metingen trekkracht diameter

In het begin van het meettraject is te zien dat de statische wrijving bij de voorspanstreng met een diameter van 15,7 mm na een grotere verplaatsing optreedt.

Verder is er nauwelijks een verschil in wrijvingscoëfficiënt tussen de verschillende gemeten diameters. De diameter speelt een ondergeschikte rol bij de wrijvingscoëfficiënt.

### 6.3.3. Verplaatsingsnelheid

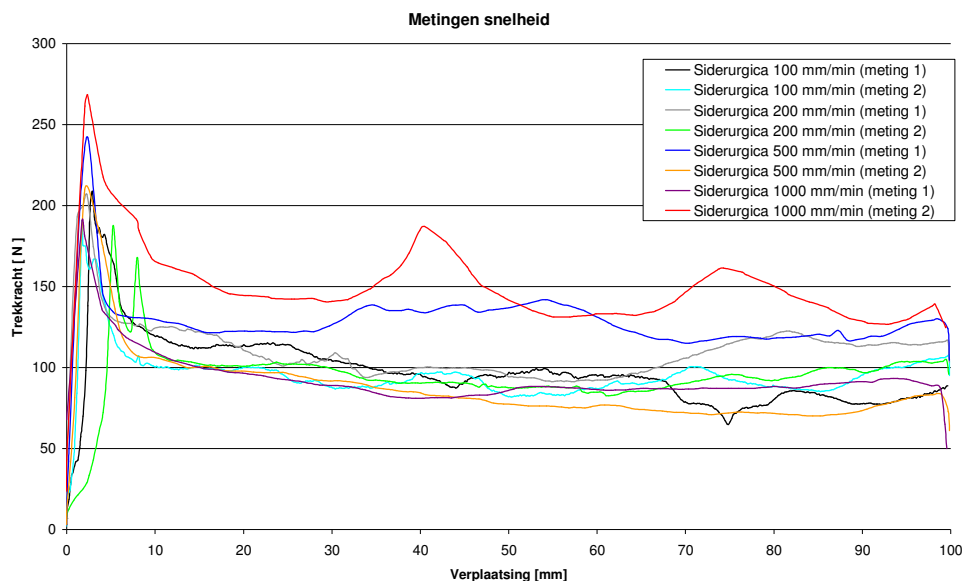
Bij de derde meting is parameter 03 (verplaatsingsnelheid) onderzocht. De overige parameters zijn bij de metingen gelijk gehouden:

01. fabrikant = Siderurgica
02. diameter = 12.9 mm
04. aangebrachte normaalkracht = 1000 N
05. rotatie = vrij mogelijk

De verplaatsingsnelheid is gevarieerd van 100, 200, 500 en 1000 mm/min. De correctie, beschreven in paragraaf 6.2.1, zijn bij de resultaten nog niet verrekend. De volgende gemiddelde waarden zijn gemeten voor de trekkracht:

Snelheid [mm/min]	Gemiddelde trekkracht
100	76 N
200	101 N
500	105 N
1000	120 N

De metingen van de trekkracht aanzien van parameter 03, verplaatsingsnelheid, zijn in figuur 6.15 uitgezet.



Figuur 6.15 Metingen trekkracht verplaatsingsnelheid

De wrijvingscoëfficiënt van de gemeten verplaatsingsnelheden wijken onderling niet veel van elkaar af. Bij de hogere verplaatsingsnelheid zijn er wel twee uitschieters gemeten. Het verschil tussen de gemiddelde waarden en de uitschieters zijn niet groot. De verplaatsingsnelheid is niet van invloed bij de bepaling van de wrijvingscoëfficiënt.

Tijdens de oriënterende meting is vastgesteld dat de verplaatsingsnelheid een rol speelt bij de metingen. Na de metingen blijkt dit niet het geval te zijn. Niet de verplaatsingsnelheid, maar de



versnelling van het trekken blijkt een invloedsfactor te zijn. De invloed van de versnelling is verder niet meer onderzocht; in de praktijk wordt met een constante snelheid gespannen.

### 6.3.4. Normaalkracht

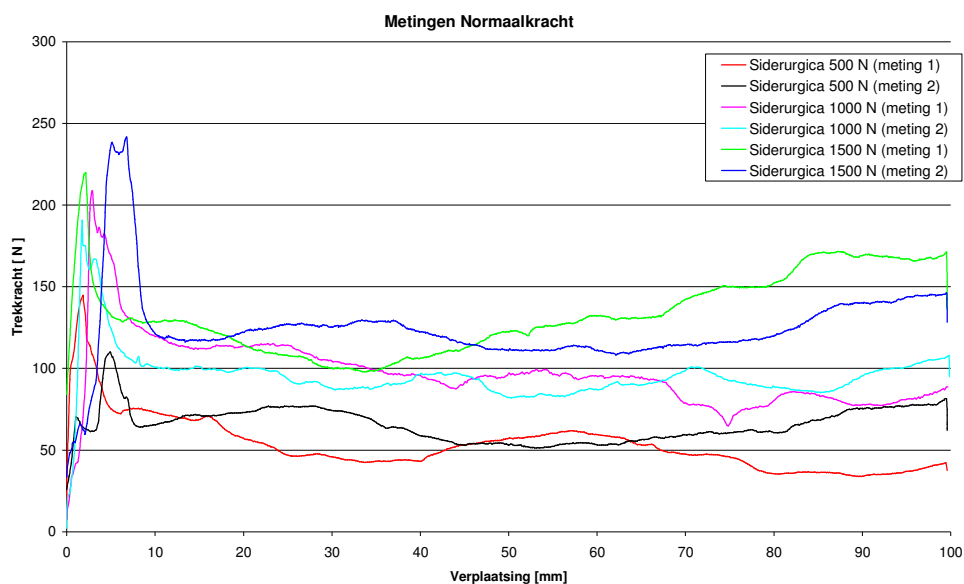
Bij de vierde meting is parameter 04 (aangebrachte normaalkracht) onderzocht. De overige parameters zijn bij de metingen gelijk gehouden:

01. fabrikant = Siderurgica
02. diameter = 12.9 mm
03. verplaatsingssnelheid = 100 mm/min
05. rotatie = vrij mogelijk

De normaalkracht is met drie verschillende niveaus onderzocht: 500 N, 1000 N en 1500 N. De correctie, beschreven in paragraaf 6.2.1, zijn bij de resultaten nog niet verrekend. De gemiddelde waarden voor de trekkracht zijn als volgt:

Normaalkracht [N]	Gemiddelde trekkracht
500	59 N
1000	76 N
1500	128 N

De metingen van de trekkracht ten aanzien van parameter 04, aangebrachte normaalkracht, zijn in figuur 6.16 uitgezet.



Figuur 6.16 Metingen trekkracht normaalkracht

Bij een vergroting van de normaalkracht, neemt de benodigde trekkracht toe. De verhouding tussen deze beiden (wrijvingscoëfficiënt) blijft nagenoeg gelijk. Hiermee is er wel een invloed van de normaalkracht, maar omgezet naar een wrijvingscoëfficiënt is deze invloed verdisconteerd.

### 6.3.5. Rotatievrijheid

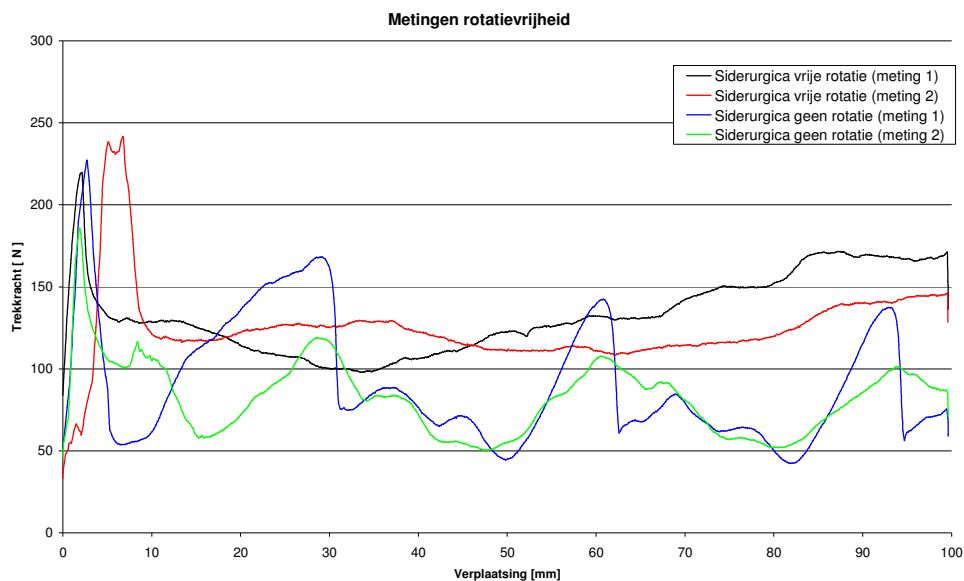
Bij de laatste meting is parameter 05 (rotatievrijheid vijzel) onderzocht. De overige parameters zijn bij de metingen gelijk gehouden:

01. fabrikant = Siderurgica
02. diameter = 12.9 mm
03. verplaatsingssnelheid = 100 mm/min
04. aangebrachte normaalkracht = 1500 N

Bij de meting is onderzoek verricht naar rotatie-vrij en rotatie-verhindering. De correctie, beschreven in paragraaf 6.2.1, zijn bij de resultaten nog niet verrekend. De gemiddelde waarden voor de trekkracht zijn als volgt:

Rotatie	Gemiddelde trekkracht
Vrije rotatie	128 N
Verhinderde rotatie	87 N

De metingen van de trekkracht ten aanzien van parameter 05, rotatievrijheid, zijn in figuur 6.17 uitgezet.



Figuur 6.17 Metingen trekkracht rotatievrijheid

Bij voorspanstrengen met een verhinderde rotatievrijheid zijn twee opmerkingen te plaatsen:

1. De gemiddelde wrijvingscoëfficiënt, bij voorspanstrengen met een rotatieverhindering, ligt lager dan bij metingen met een vrije rotatie van de vijzel. De lengte waarover de wrijving kan ontstaan is kleiner bij een rotatieverhindering, hieronder ontstaat minder wrijving;
2. Er is een duidelijk onderscheid tussen de hoogste en de laagste wrijvingscoëfficiënt. De hoogste waarden hebben steeds een onderlinge afstand die gelijk is aan de slaglengte van de voorspanstreng (zie figuur 6.18).



Figuur 6.18 Slaglengte Siderurgica voorspanstreng

De rotatievrijheid van de vijzel is een parameter die van invloed is op de wrijving. Een rotatieverhinderend heeft een positief effect op de wrijving.

## 6.4. Wrijvingscoëfficiënt

In onderstaand voorbeeld is beschreven hoe de correctie in de resultaten zijn verwerkt.

Vb. Parameter = fabrikant  
 Onderzocht = Nedri  
 Gem. normaalkracht = 948 N  
 Gem. trekkracht = 82 N

Gem. normaalkracht na correctie = 948 N  
 Gem. trekkracht na correctie = 82 – 32 = 50 N

$$\text{Wrijvingscoëfficiënt na correctie} = \frac{F}{2F_N} = \frac{50}{2 \cdot 948} = 0.026$$

De kracht van de voorafgaande metingen zijn verminderd met metingen uit situatie B (zoals uitgewerkt in bovenstaand voorbeeld) en omgerekend naar een wrijvingscoëfficiënt. Deze zijn weergegeven in tabel 6-1.

Tabel 6-1 Optredende wrijvingscoëfficiënt na vermindering invloed volledige omhulling (situatie B)

Parameters	Onderzocht	Wrijvingscoëfficiënt Situatie C	Aantal metingen
Fabrikant	Nedri	0.026	2x
	Siderurgica	0.035	2x
Diameter	12,9 mm	0.026	2x
	15,7 mm	0.033	2x
Verplaatsingssnelheid	100 mm/min	0.035	2x
	200 mm/min	0.037	2x
	500 mm/min	0.038	2x
	1000 mm/min	0.045	2x
Normaalkracht	500 N	0.029	2x
	1000 N	0.035	2x
	1500 N	0.035	2x
Rotatievrijheid	Vrije rotatie	0.035	2x
	Verhinderde rotatie	0.019	2x

## 6.5. Conclusie wrijvingsmetingen

Tijdens de meting is duidelijk naar voren gekomen dat de invloed van de parameters eigenschappen voorspanstreng, diameter voorspanstreng, verplaatsingssnelheid en normaalkracht zeer minimaal is, kijkend naar de uiteindelijke wrijvingscoëfficiënt.

Parameter 05 geeft wel een verschil tussen de metingen met en zonder rotatieverhindering van de vijzel. In de praktijk draait de vijzel mee met de slag van de voorspanstreng. Echter wordt de vijzel enigszins gehinderd te roteren door de aanwezigheid van aangesloten hydraulische slangen op de vijzel. In de praktijk is er sprake van een gedeeltelijke rotatiebeperking. De invloed van deze rotatieverhindering heeft een positieve werking op de wrijving.

Als conclusie van de laboratoriummetingen kan worden gezegd dat alle resultaten van de verschillende parameters gelijk zijn aan elkaar. De onderzochte parameters zijn nauwelijks van invloed.

Wat verder geconcludeerd kan worden, is dat de gemiddelde wrijvingscoëfficiënt van alle afzonderlijke laboratoriummetingen ( $\mu = 0.033$ ) lager is dan de ondergrens van de in de norm vastgestelde waarden voor de wrijvingscoëfficiënt (zie NEN 6720, art 4.1.4.5.; omhulde voorspanstrengen:  $\mu = 0.050 - 0.100$ ).

Bij de berekening van de verliezen ten gevolge van de wrijving kan een lagere waarde worden aangehouden voor de wrijvingscoëfficiënt, tussen de 0.033 en de 0.050. Opmerking: er zijn slechts een beperkt aantal metingen verricht waaruit de conclusie is getrokken.

## 7. Metingen praktijk

### 7.1. Inleiding

Naast de metingen in het laboratorium zijn 29 metingen op grote schaal uitgevoerd. Per situatie zijn een beperkt aantal metingen verricht. De metingen zijn zodanig gekozen dat enkele invloeden verder geanalyseerd kunnen worden.

De volgende invloeden kunnen worden geanalyseerd met de metingen:

- Invloed diameter voorspanstreng;
- Invloed lengte voorspanstreng;
- Invloed eigenschappen fabrikant;
- Invloed verhouding lengte en som doorlopen hoeken voorspanstreng.

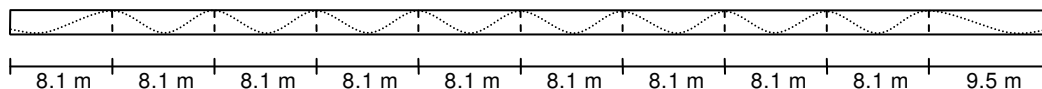
In de volgende paragraaf zijn de verschillende projecten, waar metingen zijn verricht, uitgewerkt.

### 7.2. Projectomschrijving

#### 7.2.1. Kavel 13, Amsterdam

Project Kavel 13, in de omgeving van Amsterdam Bijlmer, is een kantorencomplex met bijbehorend een parkeergarage. De parkeergarage is uitgevoerd als een strokenvloer en de afzonderlijke overspanningen zijn 8.1 meter of 9.5 meter. De totale lengte van de voorspanstreng is 82.4 meter.

Het gekromde kabelverloop van de voorspanstreng is weergegeven in figuur 7.1.



Figuur 7.1 Kabelverloop voorspanstreng Kavel 13

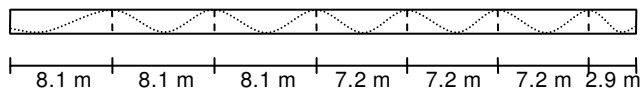
De voorspankracht is niet direct gemeten met een drukdoos, maar berekend met behulp van de druk aangebracht op het spanvijsel. Deze druk is af te lezen met een manometer bevestigd op de vijselpomp. De manometer geeft het aantal bar aan dat op het voorspanvijsel is aangebracht. De druk in bar kan ook uitgedrukt worden in  $N/m^2$ . Door het oppervlak van de voorspanvijsel te vermenigvuldigen met de aangebrachte druk kan de aangebrachte voorspankracht worden bepaald. De manometer is voorafgaand aan de metingen opnieuw gekalibreerd.

Er zijn voorspanstrengen met een recht en een gekromd kabelverloop gemeten. De toegepaste diameter is 12.9 mm. Bij project Kavel 13 zijn uitsluitend de voorspankrachten gemeten.

#### 7.2.2. Riekerpolder, Amsterdam

Project Riekerpolder is een kantorencomplex met bijbehorend een gedeeltelijk ondergrondse parkeergarage. De parkeergarage is uitgevoerd als een strokenvloer in het werk gestort en de stroken zijn voorgespannen. De overspanningen zijn 7.2 meter of 8.1 meter. De totale overspanning van de gemeten stroken is 49.7 meter.

Het gekromde kabelverloop van de voorspanstreng is weergegeven in figuur 7.2.



Figuur 7.2 Kabelverloop voorspanstreng Riekerpolder

De voorspankracht is aan beide zijden gemeten met behulp van een geijkte drukdoos. De drukdoos is geplaatst tussen het beton en de voorspanvijzel. In figuur 7.3 is te zien hoe de plaatsing van de drukdoos en spanvijzel is uitgevoerd.



Figuur 7.3 Plaatsing drukdoos

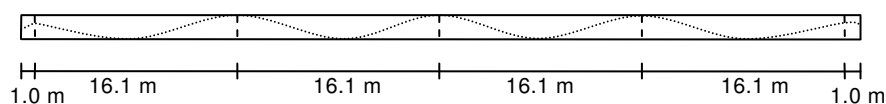
Voor de metingen bij project Riekerpolder zijn diameters van 12.9 mm en 15.7 mm toegepast. Daarnaast zijn voorspanstrengen van fabrikant Nedri en fabrikant Siderurgica toegepast. De verschillende invloeden zijn zowel gemeten bij voorspanstrengen met een recht als gekromd kabelverloop.

### 7.2.3. Windesheim, Zwolle

Project Windesheim in Zwolle is een uitbreiding van de Hogeschool Windesheim in Zwolle. De uitbreiding bestaat uit een ondergrondse parkeergarage en 10 split-level verdiepingen. De metingen zijn verricht op één van de verdiepingen van het complex.

De vloerconstructie is opgebouwd uit een BubbleDeck vloersysteem en in de lengterichting voorgespannen ter plaatse van de kolomstrook. Een enkele overspanning tussen twee kolommen heeft een lengte van 16.1 meter en de totale lengte van de voorspanstreng is 66.4 meter.

Het verloop van de voorspanstreng is weergegeven in figuur 7.4.



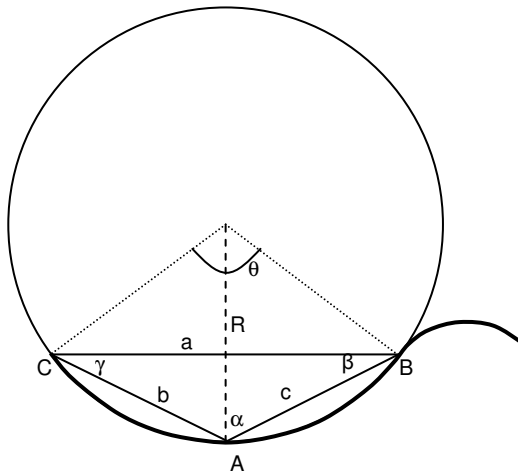
Figuur 7.4 Kabelverloop voorspanstreng Windesheim

De voorspankracht is net zoals bij Kavel 13 niet direct gemeten, maar bepaald aan de hand van de druk afgelezen op geijkte manometers op de vijzelpomp.

### 7.3. Bepaling doorlopen hoek

Voor de analyse van de metingen moet het kabelverloop bekend zijn. Op de uitvoeringstekeningen wordt de afstand tussen voorspanstreng en onderkant constructie aangegeven. Dit is per meter uitgezet. Met behulp van de hoogtelijnen is de kromming terug te rekenen.

In figuur 7.5 is weergegeven hoe de kromming en hoek kunnen worden omgezet tot een geometrisch te berekenen vorm.



Figuur 7.5 Kromming en hoek

Het kabelverloop kan worden beschreven als de som van de doorlopen hoeken. Om de hoek te bepalen zijn een aantal stappen nodig. Allereerst moeten de coördinaten van punten A, B en C bekend zijn. Deze coördinaten komen voort uit de uitvoeringstekeningen. Hierop staat per meter de hoogtemaat uitgezet.

Nadat de punten bekend zijn, kan met de stelling van Pythagoras de lengten a, b en c worden uitgerekend. Met behulp van de basisverhoudingen uit de geometrie kunnen vervolgens de hoeken ( $\alpha$ ,  $\beta$  en  $\gamma$ ) worden berekend.

De straal van de cirkel is met de sinusregel te herleiden:

$$\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma} = 2R \quad \{7.1\}$$

Hierbij zijn a, b en c de lengten en  $\alpha$ ,  $\beta$  en  $\gamma$  de hoek en R de straal van de cirkel.

Tot slot kan de hoek  $\theta$  worden berekend met de formule:

$$\theta = 2 \times \sin^{-1} \left( \frac{a}{2R} \right), \text{ waarbij } \theta \text{ de hoek in radialen is.} \quad \{7.2\}$$

Voorbeeld:

Coördinaten A (3000, 10) / B (0,220) / C (6000,220)

$a = 6000 \text{ mm}$

$$b = c = \sqrt{3000^2 + (220 - 10)^2} = 3007 \text{ mm}$$

$$\cos \beta = \cos \gamma = \frac{3000}{3007} \rightarrow \beta = \gamma = 4.0^\circ$$

$$\alpha = 180 - \beta - \gamma \rightarrow \alpha = 180 - 4 - 4 = 172^\circ$$

$$R = \frac{\left( \frac{6000}{\sin(172)} \right)}{2} = 21556 \text{ mm}$$

$$\theta = 2 \times \sin^{-1} \left( \frac{6000}{2 \times 21556} \right) = 0.28 \text{ rad}$$

Alle afzonderlijke hoeken bij elkaar opgeteld, levert de totale som van de doorlopen hoek.

## 7.4. Invloed diameter

### 7.4.1. Inleiding

De eerste invloed waar onderzoek naar is verricht, is de invloed van de diameter van de voorspanstreng. Bij de praktijkmetingen zijn twee diameters toegepast en gemeten. Door een vergelijking te maken tussen voorspanstrengen met eenzelfde lengte, kromtestraal en fabrikant kan de invloed van de diameter worden vastgesteld.

### 7.4.2. Resultaten

#### 7.4.2.1. Recht kabelverloop

In tabel 7-1 staan de wrijvingsverliezen van de voorspanstrengen met een diameter van 12.9 mm en 15.7 mm. Van beide diameters zijn drie metingen uitgevoerd. De wrijvingsverliezen zijn bepaald door de gemeten voorspankracht aan de passieve zijde van de voorspanstreng af te trekken van de aangebrachte voorspankracht aan de actieve zijde van de voorspanstreng.

Tabel 7-1 Wrijvingsverlies: diameter varieert, lengte 49.7 meter, fabrikant Nedri

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Wrijvingsverlies [kN]	Wrijvingsverlies [kN/m]
Nedri	49.7	12.9	7	0.14
Nedri	49.7	12.9	8	0.16
Nedri	49.7	12.9	10	0.20
Nedri	49.7	15.7	6	0.12
Nedri	49.7	15.7	9	0.18
Nedri	49.7	15.7	9	0.18



### 7.4.2.2. Gekromd kabelverloop

In tabel 7-2 staan de wrijvingsverliezen van de voorspanstrengen met een diameter van 12.9 mm en 15.7 mm. Van beide diameters zijn twee metingen uitgevoerd.

Tabel 7-2 Wrijvingsverlies: diameter varieert, lengte 49.7 meter, doorlopen hoek 2.48 en 2.83 rad, fabrikant Nedri

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Som van doorlopen hoek [rad]	Wrijvingsverlies [kN]	Wrijvingsverlies [kN/m]
Nedri	49.7	12.9	2.48	20	0.40
Nedri	49.7	12.9	2.48	21	0.42
Nedri	49.7	15.7	2.83	16	0.32
Nedri	49.7	15.7	2.83	21	0.42

### 7.4.3. Analyse

#### 7.4.3.1. Recht kabelverloop

De gemeten wrijvingsverliezen wijken bij zowel de voorspanstreng met een diameter van 12.9 mm als 15.7 mm niet veel van elkaar af. Bij de analyse wordt gebruik gemaakt van het gemiddelde wrijvingsverlies. In tabel 7-3 zijn de gemiddelde wrijvingsverliezen opgesomd.

Tabel 7-3 Gemiddelde wrijvingsverliezen in relatie tot diameter

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Gemiddeld wrijvingsverlies [kN]	Theoretische wrijvingsverlies [kN]
Nedri	49.7	12.9	8.3	22.7
Nedri	49.7	15.7	8.0	34.0

Het absolute wrijvingsverlies is gelijk, terwijl de aangebrachte voorspankracht afwijkt. Bij 12.9 mm is de aangebrachte voorspankracht  $\approx 147$  kN, bij 15.7 mm is de aangebrachte voorspankracht  $\approx 220$  kN. Dit betekent dat de relatieve wrijvingsverliezen van een voorspanstreng met een diameter van 15.7 mm minder zijn dan de relatieve wrijvingsverliezen bij een voorspanstreng met een diameter van 12.9 mm.

Het oppervlak waarover wrijving ontstaat, is de omtrek van de voorspanstreng vermenigvuldigd met de lengte van de voorspanstreng. Bij de bovenstaande metingen is de lengte van de voorspanstreng gelijk, dus kan volstaan worden met een analyse van de omtrek van de voorspanstreng.

De aangebrachte voorspankracht is het oppervlak van de voorspanstreng vermenigvuldigd met de rekenwaarde van de 0,1%-rekgrens van voorspanstaal ( $f_p$ ). De rekenwaarde is, vanwege dezelfde staalkwaliteit (FeP 1860), gelijk aan elkaar. Hierdoor kan worden volstaan met het een analyse van het oppervlak van de voorspanstreng.

De eigenschappen van de voorspanstreng met een recht kabelverloop zijn te vinden in tabel 7-4.

Tabel 7-4 Gegevens voorspanstreng diameter 12.9 mm en 15.7 mm met recht kabelverloop

Diameter voorspanstreng	12.9 mm	15.7 mm
Omtrek voorspanstreng (gebaseerd op nominale diameter)	40.5 mm	49.3 mm
Oppervlakte voorspanstreng	100 mm <sup>2</sup>	150 mm <sup>2</sup>
<b>Verhouding omtrek/oppervlak</b>	<b>0.405</b>	<b>0.329</b>
Gemiddeld wrijvingsverlies	8.3	8.0
Aangebrachte voorspankracht	147 kN	220 kN
<b>Verhouding wrijvingsverlies/aangebrachte voorspankracht</b>	<b>5.6%</b>	<b>3.6%</b>

Bij de voorspanstreng met een diameter van 12.9 mm is de verhouding tussen de omtrek en oppervlak groter dan bij de voorspanstreng met een diameter van 15.7 mm. Een vergelijk tussen de verhouding omtrek/oppervlak en wrijvingsverlies/voorspankracht toont aan dat er een relatie bestaat tussen toegepaste diameter en het optredende wrijvingsverlies.

### 7.4.3.2. Gekromd kabelverloop

In tabel 7-5 zijn de gemiddelde wrijvingsverliezen opgesomd.

Tabel 7-5 Gemiddelde wrijvingsverliezen in relatie tot diameter

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Gemiddeld wrijvingsverlies [kN]	Theoretische wrijvingsverlies [kN]
Nedri	49.7	12.9	20.5	43.8
Nedri	49.7	15.7	18.5	65.5

Net zoals bij de voorspanstrengen met een recht kabelverloop is de aanvangsvoorspankracht bij de voorspanstreng met een grotere diameter hoger.

De eigenschappen van de voorspanstreng met een gekromd kabelverloop zijn te vinden in tabel 7-6.

Tabel 7-6 Gegevens voorspanstreng diameter 12.9 mm en 15.7 mm met gekromd kabelverloop

Diameter voorspanstreng	12.9 mm	15.7 mm
Omtrek voorspanstreng (gebaseerd op nominale diameter)	40.5 mm	49.3 mm
Oppervlakte voorspanstreng	100 mm <sup>2</sup>	150 mm <sup>2</sup>
<b>Verhouding omtrek/oppervlak</b>	<b>0.405</b>	<b>0.329</b>
Gemiddeld wrijvingsverlies	20.5	18.5
Aangebrachte voorspankracht	147 kN	220 kN
<b>Verhouding wrijvingsverlies/aangebrachte voorspankracht</b>	<b>13.9%</b>	<b>8.4%</b>

Een vergelijk tussen de verhouding omtrek/oppervlak en wrijvingsverlies/voorspankracht toont aan dat er een relatie bestaat tussen toegepaste diameter en het optredende wrijvingsverlies. Bij de voorspanstreng met een gekromd kabelverloop is de verhouding tussen de omtrek en het oppervlak van de voorspanstreng een goede indicatiewaarde om de invloed van de diameter op het wrijvingsverlies uit te drukken.

### 7.4.3.3. Conclusie

De diameter is zowel bij de voorspanstreng met een recht als gekromd kabelverloop van invloed op het wrijvingsverlies. De verhouding tussen de omtrek en het oppervlak is een goede indicatiewaarde om de invloed van de diameter op het wrijvingsverlies uit te drukken.

## 7.5. Invloed lengte en kabelverloop

### 7.5.1. Inleiding

Eveneens zijn metingen verricht om de invloed van de lengte te analyseren. Er is een aantal metingen verricht bij een diameter van 12.9 mm en 15.7 mm. Dit telt voor zowel voorspanstrengen met een recht als een gekromd kabelverloop. De resultaten van de metingen zijn in de volgende paragraaf terug te vinden.

Bij de resultaten van voorspanstrengen met een gekromd kabelverloop is naast de lengte ook de som van de totale doorlopen hoek van invloed. Om de invloeden afzonderlijk te onderzoeken is een meting verricht naar voorspanstrengen met een gelijk gekromd kabelverloop, maar hier is een deel van de voorspanstrengen korter. De lengte is in dit geval niet 49.7 meter, maar 46.8 meter en de som van doorlopen hoek is van 2.83 rad afgenomen tot 2.78 rad.

## 7.5.2. Resultaten

### 7.5.2.1. Recht kabelverloop

In tabel 7-7 staan de wrijvingsverliezen van de voorspanstrengen met een diameter van 12.9 mm en een lengte van 49.7 meter en 82.4 meter. Van beide lengten zijn drie metingen uitgevoerd.

Tabel 7-7 Wrijvingsverlies: lengte varieert, diameter 12.9 mm, fabrikant Nedri

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Wrijvingsverlies [kN]	Wrijvingsverlies [kN/m]
Nedri	49.7	12.9	7	0.14
Nedri	49.7	12.9	8	0.16
Nedri	49.7	12.9	10	0.20
Nedri	82.4	12.9	22	0.27
Nedri	82.4	12.9	22	0.27
Nedri	82.4	12.9	30	0.36

In tabel 7-8 staan de wrijvingsverliezen van de voorspanstrengen met een diameter van 15.7 mm en lengte van 49.7 meter en 66.4 meter. Bij de voorspanstreng met een lengte van 49.7 meter zijn drie metingen uitgevoerd. Het wrijvingsverlies van de voorspanstreng met een lengte van 66.4 meter is één meting uitgevoerd.

Tabel 7-8 Wrijvingsverlies: lengte varieert, diameter 15.7 mm, fabrikant Nedri

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Wrijvingsverlies [kN]	Wrijvingsverlies [kN/m]
Nedri	49.7	15.7	6	0.12
Nedri	49.7	15.7	9	0.18
Nedri	49.7	15.7	9	0.18
Nedri	66.4	15.7	17	0.26

### 7.5.2.2. Gekromd kabelverloop

In tabel 7-9 staan de wrijvingsverliezen van de voorspanstrengen met een diameter van 12.9 mm en een lengte van 49.7 meter en 82.4 meter. Ook is de som van doorlopen hoeken opgeschreven.

Tabel 7-9 Wrijvingsverlies: lengte en som van doorlopen hoek varieert, diameter 12.9 mm, fabrikant Nedri

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Som van doorlopen hoek [rad]	Wrijvingsverlies [kN]	Wrijvingsverlies [kN/m]
Nedri	49.7	12.9	2.48	20	0.40
Nedri	49.7	12.9	2.48	21	0.42
Nedri	82.4	12.9	8.19	28	0.34
Nedri	82.4	12.9	8.19	32	0.39
Nedri	82.4	12.9	8.19	32	0.39
Nedri	82.4	12.9	8.19	32	0.39

In tabel 7-10 staan de wrijvingsverliezen van de voorspanstrengen met een diameter van 15.7 mm en lengte van 49.7 meter en 66.4 meter. Daarnaast is ook de som van doorlopen hoeken weergegeven. Bij een lengte van 49.7 meter zijn twee metingen uitgevoerd. Het wrijvingsverlies van de voorspanstreng met een lengte van 66.4 meter zijn gemeten bij vier voorspanstrengen.

Tabel 7-10 Wrijvingsverlies: lengte en som van doorlopen hoek varieert, diameter 15.7 mm, fabrikant Nedri

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Som van doorlopen hoek [rad]	Wrijvingsverlies [kN]	Wrijvingsverlies [kN/m]
Nedri	49.7	15.7	2.83	16	0.32
Nedri	49.7	15.7	2.83	21	0.42
Nedri	66.4	15.7	1.25	18	0.27
Nedri	66.4	15.7	1.25	18	0.27
Nedri	66.4	15.7	1.25	21	0.32
Nedri	66.4	15.7	1.25	24	0.36

In tabel 7-11 zijn de metingen te zien van de voorspanstrengen met een gelijk kabelverloop, maar waar twee voorspanstrengen korter zijn. Door de verminderde lengte neemt ook de som van doorlopen hoek af. Er bestaat geen lineair verband tussen de lengte en som van doorlopen hoek.

Tabel 7-11 Wrijvingsverlies, lengte varieert, som doorlopen hoek varieert, diameter 15.7 mm, fabrikant Nedri

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Som van doorlopen hoek [rad]	Wrijvingsverlies [kN]	Wrijvingsverlies [kN/m]
Nedri	46.8	15.7	2.78	10	0.21
Nedri	46.8	15.7	2.78	14	0.30
Nedri	49.7	15.7	2.83	16	0.32
Nedri	49.7	15.7	2.83	21	0.42

## 7.5.3. Analyse

### 7.5.3.1. Recht kabelverloop

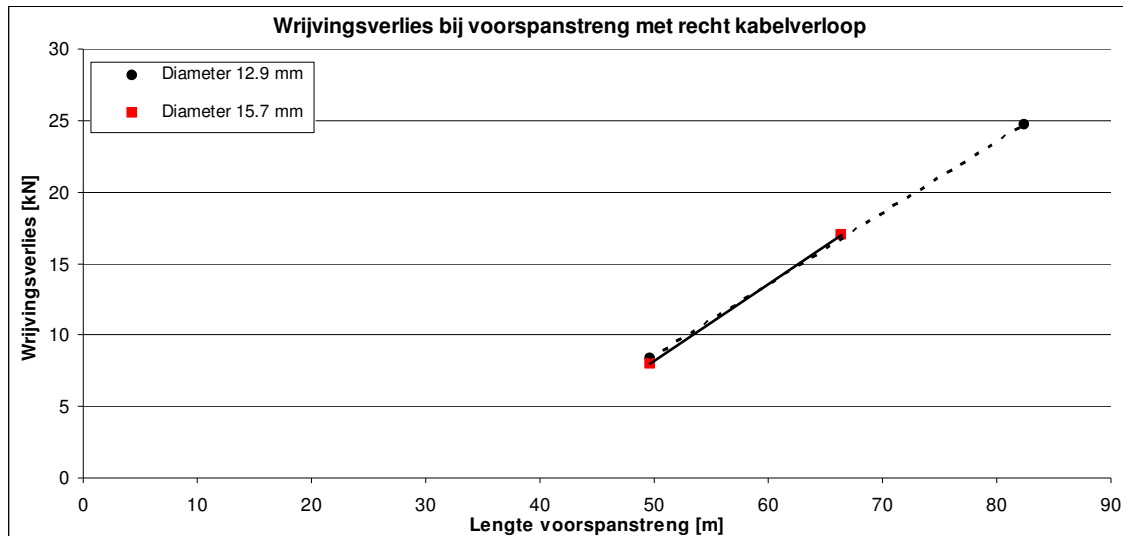
In tabel 7-12 zijn de gemiddelde wrijvingsverliezen opgesomd.

Tabel 7-12 Gemiddelde wrijvingsverliezen in relatie tot lengte

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Gemiddeld wrijvingsverlies [kN]	Theoretisch wrijvingsverlies [kN]
Nedri	49.7	12.9	8.3	43.8
Nedri	82.4	12.9	24.7	89.7
Nedri	49.7	15.7	8.0	69.5
Nedri	66.4	15.7	17.0	56.4

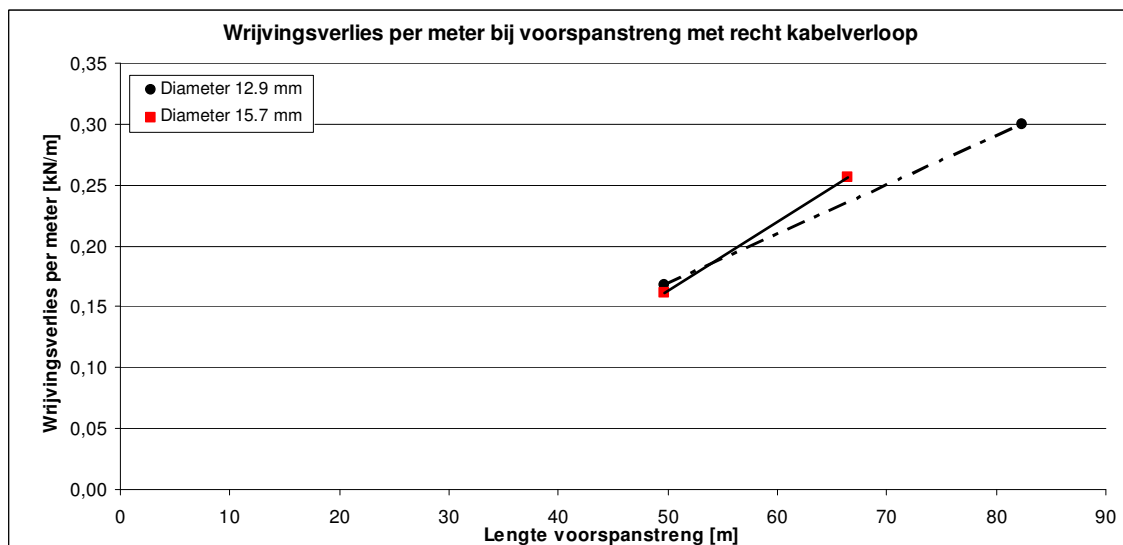
De gemiddelde wrijvingsverliezen bij een voorspanstreng met een recht kabelverloop zijn uitgezet in figuur 7.6. In de figuur zijn de beide diameters apart weergegeven, omdat de invloed van de diameter hier buiten beschouwing gehouden wordt.

Bij beide diameters heeft de lengte van de voorspanstreng invloed op het totale wrijvingsverlies. Wat opvalt is dat de wrijvingsverliezen van zowel de 12.9 mm als de 15.7 mm een gelijke trend laten zien. Wat verder opvalt, is dat indien de lijn geëxtrapoleerd wordt deze niet door de oorsprong loopt (bij een lineair verloop).



Figuur 7.6 Wrijvingsverlies rechte voorspanstreng

Om de invloed van de lengte verder te onderzoeken is het wrijvingsverlies gedeeld door de lengte. Het wrijvingsverlies per meter kan inzicht geven wat de invloed is van de lengte. Het wrijvingsverlies per meter is uitgezet in figuur 7.7. Als de lijn geëxtrapoleerd wordt, komt de lijn door de oorsprong. Figuur 7.7 is de afgeleide van figuur 7.6. Er kan nu worden gesteld dat het verloop van het wrijvingsverlies niet lineair is, gebaseerd op deze meetserie.



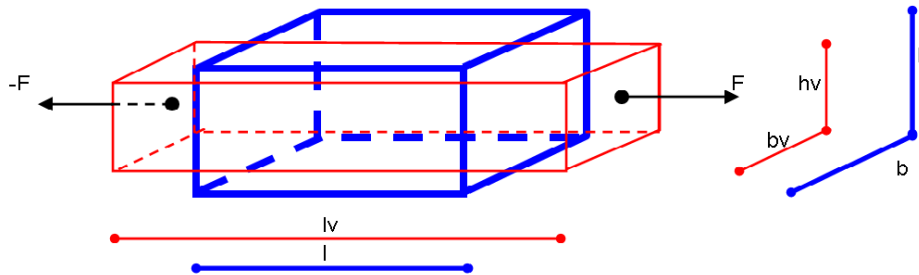
Figuur 7.7 Wrijvingsverlies per meter rechte voorspanstreng

Het wrijvingsverlies per meter neemt toe naarmate de lengte van de voorspanstreng toeneemt.

Hypothese 1: Oorzaak dat het wrijvingsverlies per meter toeneemt naarmate de lengte van de voorspanstreng groter is, is de invloed van de dwarscontractie van het voorspanstaal.

Dwarscontractie is een effect dat optreedt onder invloed van een normaalkracht op een element. Als een element wordt belast door een normaalkracht, zal deze verkorten of verlengen. Bovendien zal, bij verlenging, het element dunner worden en bij verkorting dikker.

De invloed van de dwarscontractie is schematisch weergegeven in figuur 7.8. De blauwe systeemlijnen geven de beginsituatie weer. De rode systeemlijnen geven de situatie ten gevolge van de dwarscontractie weer.



Figuur 7.8 Invloed dwarscontractie

De dwarscontractie wordt met de Poisson-factor aangeduid. In formulevorm:

$$\nu = \frac{\epsilon_{dwars}}{\epsilon_{langs}} \quad \{7.3\}$$

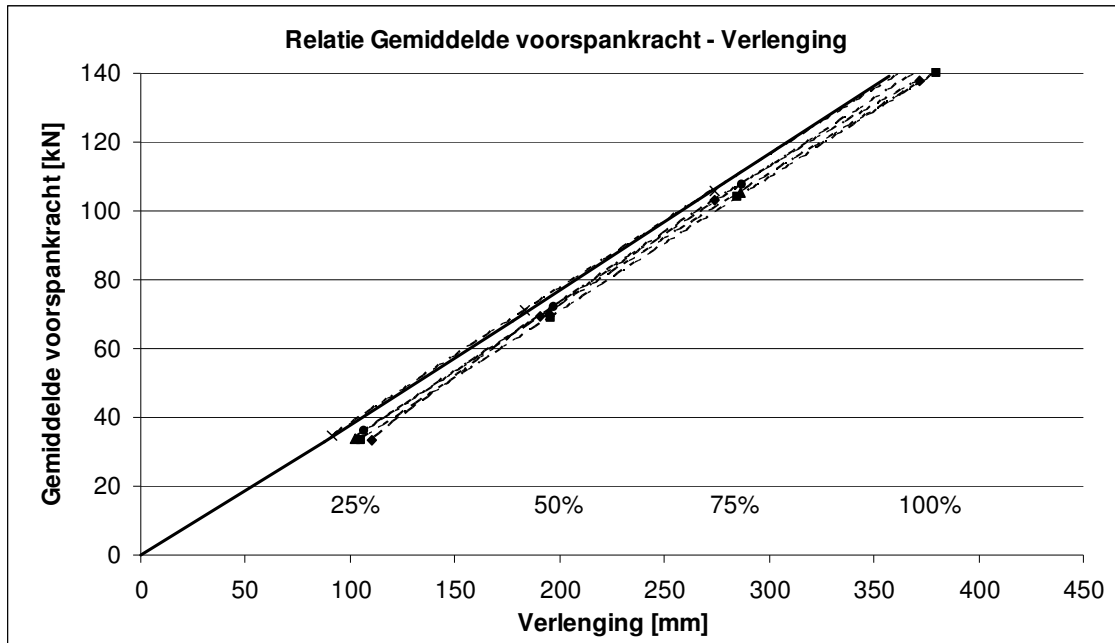
Als opmerking moet worden geplaatst dat de voorspanstreng bestaat uit voorspandraden met verschillende lengten. De lengte van de centrale draad is kleiner dan de buitenste draden. Het verschil in lengten is ongeveer 0.2%. Deze invloed zal bij de dwarscontractie minimaal zijn en wordt daarmee niet meegenomen. De lengte van de voorspanstreng wordt in verdere analyse gelijk gesteld aan de lengte van de centrale draad.

Bij korte voorspanstrengen is de gemiddelde voorspankracht groter. Hierdoor ontstaat een grotere dwarscontractie. Door het dunner worden van de voorspanstreng is het oppervlak waarover wrijving tussen voorspanstreng en omhulling kleiner en ontstaat minder wrijving.

Om de invloed van de dwarscontractie te onderzoeken, is hier een meting naar verricht. Bij deze meting is bij een voorspanstreng de uiteindelijke voorspankracht in verschillende spanfasen aangebracht (25%, 50%, 75% en 100% van de uiteindelijke voorspankracht).

Als de hypothese waar is, zou de verlenging meer toenemen ten opzichte van de aangebrachte voorspankracht. Hiervan zou de dwarscontractie dan de oorzaak van kunnen zijn.

In figuur 7.9 zijn de metingen weergegeven van de voorspanstrengen met een diameter van 12.9 mm. De gestippelde lijnen geven de trend van de metingen weer. De doorgetrokken lijn geeft de verlenging weer volgens de Wet van Hooke (lineaire verdeling).



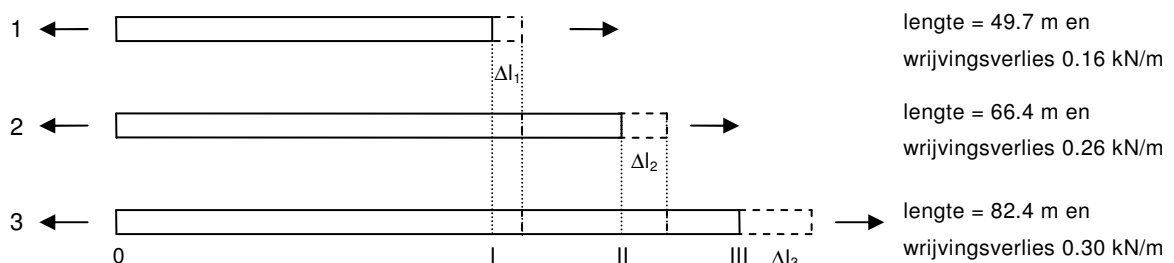
Figuur 7.9 Relatie passieve voorspankracht en verlenging

Zoals uit de grafiek is af te lezen, bevinden alle metingen zich rechts van de doorgetrokken lijn (lineaire verdeling volgens Wet van Hooke). De verlenging is bij alle situaties groter dan vooraf berekend. De afstand tussen de onderlinge metingen en de doorgetrokken lijn blijft constant. De metingen tonen allemaal een nagenoeg lineair verloop.

De invloed van de dwarscontractie kan aan de hand van de metingen niet worden uitgesloten, maar de resultaten tonen ook niet aan dat de dwarscontractie de invloedfactor is waarom bij grotere voorspankrachten de verlenging groter zou zijn. De hypothese kan hiermee niet bewezen of verworpen worden.

Hypothese 2: Naar mate de voorspanstreng langer wordt, ontstaat een grotere interne verplaatsing tussen omhulling en voorspanstreng. Hierdoor neemt de wrijving per meter bij langere voorspanstrengen ook toe.

Er zijn drie situaties gemeten:



Bij situatie 1 heeft de voorspanstreng een lengte van 49.7 meter. De bijbehorende verlenging is gesteld op  $\Delta l_1$ . Situatie 2 heeft een lengte van 66.4 meter en een verlenging van  $\Delta l_2 = \Delta l_1 + \Delta l_{2-1}$ . Doordat de verlenging in het elastisch gebied lineair is, kan  $\Delta l_{2-1}$  worden uitgeschreven in  $\Delta l_1$  door

$$\Delta l_{2-1} = \frac{(66.4 - 49.7)}{49.7} \times \Delta l_1. \text{ Hiermee wordt } \Delta l_2 = \Delta l_1 + 0.34 \times \Delta l_1 = 1.34 \times \Delta l_1$$

Situatie 3 heeft een lengte van 82.4 meter en een verlenging van  $\Delta l_3 = \Delta l_1 + \Delta l_{3-1}$ . Doordat de verlenging in het elastisch gebied lineair is, kan  $\Delta l_{3-1}$  worden uitgeschreven in  $\Delta l_1$  door

$$\Delta l_{3-1} = \frac{(82.4 - 49.7)}{49.7} \times \Delta l_1. \text{ Hiermee wordt } \Delta l_3 = \Delta l_1 + 0.66 \times \Delta l_1 = 1.66 \times \Delta l_1.$$

Als de hypothese waar is, zou het wrijvingsverlies dezelfde relatie moeten hebben als de verlenging. Naarmate de verlenging toeneemt, neemt het wrijvingsverlies per meter ook toe.

Tabel 7-13 Vergelijking verlenging en wrijvingsverlies

Situatie	Verhouding verlenging	Verhouding wrijvingsverlies
2 ten opzichte van 1	1.34	$\frac{0.26}{0.16} = 1.63$
3 ten opzichte van 1	1.66	$\frac{0.30}{0.16} = 1.88$

Uit tabel 7-13 kan gesteld worden dat bij een langere voorspanstreng meer wrijving ontstaat door de interne verplaatsing tussen omhulling en voorspanstreng. De verhouding van de verlenging neemt toe met 23% (van 1.34 naar 1.66) en de verhouding wrijvingsverlies neemt toe met 15% (van 1.63 naar 1.88). De verhouding tussen de verlenging en het wrijvingsverlies is niet lineair.

Dit is niet de exacte benadering, maar geeft wel een goede indicatie dat wanneer de lengte van de voorspanstreng toeneemt het verlies door wrijving toeneemt ten gevolge van de interne verplaatsing. Hiermee is aangetoond dat hypothese 2 aannemelijk is.

### 7.5.3.2. Gekromd kabelverloop

In tabel 7-14 zijn de gemiddelde wrijvingsverliezen opgesomd.

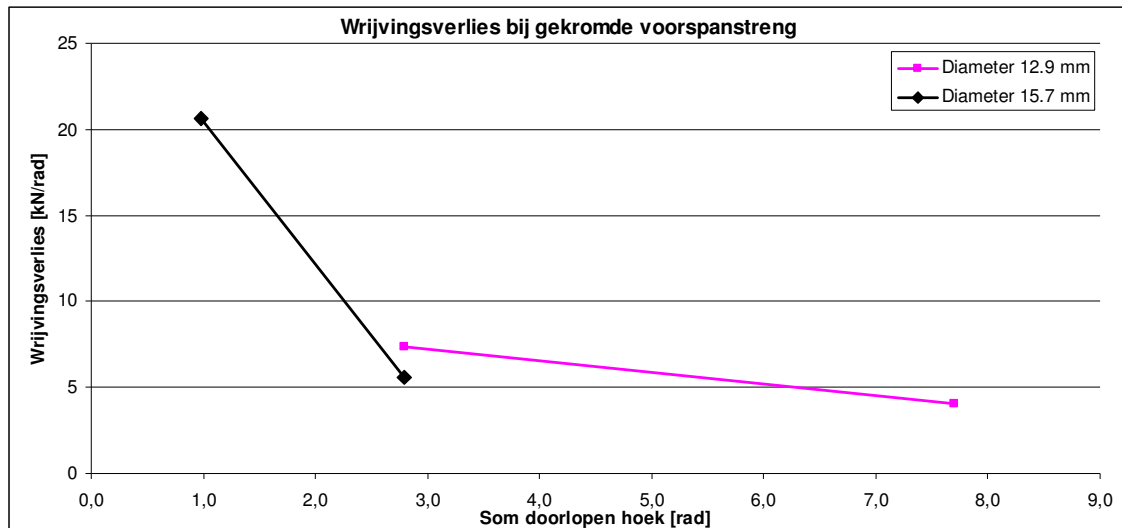
Tabel 7-14 Gemiddelde wrijvingsverliezen in relatie tot lengte

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Som van doorlopen hoek [rad]	Diameter voorspanstreng [mm]	Gemiddeld wrijvingsverlies [kN]	Gemiddeld wrijvingsverlies [kN/m]
Nedri	49.7	2.48	12.9	20.5	0.41
Nedri	82.4	8.19	12.9	31.0	0.38
Nedri	49.7	2.83	15.7	18.5	0.37
Nedri	66.4	1.25	15.7	20.3	0.30

Bij een voorspanstreng met een gekromd kabelverloop is naast de som van doorlopen hoek ook de lengte van de voorspanstreng verschillend. De lengte kan dus niet, net zoals bij het rechte kabelverloop, één op één met elkaar worden vergeleken.

In figuur 7.10 is de relatie te zien tussen het wrijvingsverlies en de som van de doorlopen hoek.





Figuur 7.10 Wrijvingsverlies in relatie tot doorlopen hoek

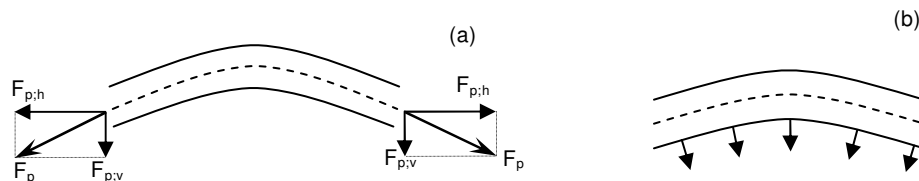
De eerste bestudering van de metingen laat zien dat:

1. Het wrijvingsverlies neemt per radiaal af bij een toename van de som van doorlopen hoek in het kabelverloop van de voorspanstreng;
2. Bij de gekromde voorspanstreng ontstaat meer wrijving per meter dan bij een rechte voorspanstreng, bij een gelijkblijvende lengte;
3. De afname van het wrijvingsverlies per radiaal is bij de voorspanstreng met een diameter van 15.7 mm sterker dan bij de voorspanstreng met een diameter van 12.9 mm.

Hypothese 1: Naarmate de lengte van de voorspanstreng toeneemt, neemt het wrijvingsverlies toe en de voorspankracht af. Door een lagere voorspankracht, zal een lagere normaalkracht optreden. De invloed van de kromming is bij een langere voorspanstreng vanwege een geringere normaalkracht een minder grote invloedsfactor.

Door de kromming in het kabelverloop van de voorspanstreng ontstaat, tijdens het aanbrengen van de voorspankracht, naast een trekkracht ook een normaalkracht in de voorspanstreng.

De krachten ontstaan door het gekromde kabelverloop zijn weergegeven in figuur 7.11.



Figuur 7.11 Krachten bij gekromd kabelverloop (a) / Optredende normaalkrachten (b)

Er is een relatie tussen de voorspankracht en de optredende normaalkracht. De normaalkracht kan uitgerekend worden door de voorspankracht te delen door de kromtestraal. Voor de metingen zijn de normaalkrachten in tabel 7-15 terug te vinden.

Tabel 7-15 Gemiddelde normaalkracht ter plaatse van kromming voorspanstreng met diameter 15.7 mm

Lengte [m]	Diameter [mm]	Som van doorlopen hoek [rad]	Gem. wrijvingsverlies [kN/m]	Normaalkracht [N]
46.8	15.7	2.78	0.26	12.52
49.7	15.7	2.83	0.37	11.84

Uit de resultaten is op te maken dat de wrijving toeneemt als de voorspanstreng langer wordt. Hierdoor wordt de gemiddelde voorspankracht kleiner. De gemiddelde normaalkracht, ten gevolge van het gekromd kabelverloop, neemt af naarmate de voorspanstreng langer wordt. De invloed van het gekromd kabelverloop heeft bij een langere voorspanstreng minder invloed. Hiermee is de hypothese aannemelijk.

Om te bepalen of de conclusie ook telt voor de andere metingen is de normaalkracht ook berekend voor de overige metingen. Deze zijn weergegeven in tabel 7-16.

Tabel 7-16 Gemiddelde normaalkracht ter plaatse van kromming voorspanstreng

Lengte [m]	Diameter [mm]	Som van doorlopen hoek [rad]	Gem. wrijvingsverlies [kN/rad]	Normaalkracht [N]
49.7	12.9	2.48	7.3	6.7
82.4	12.9	8.19	4.0	13.3
49.7	15.7	2.83	5.6	11.8
66.4	15.7	1.25	20.6	3.7

Uit de tabel is op te maken dat de hypothese niet aannemelijk is voor alle metingen. Bij een toename van de lengte en een afname van de wrijving, neemt de normaalkracht toe. Dit telt voor de voorspanstreng met een diameter van 12.9 mm. De normaalkracht heeft wel degelijk invloed op de totale wrijving, maar is niet de enige invloed. De hypothese is in bepaalde situaties aannemelijk en in een aantal gevallen te verwerpen.

### 7.5.3.3. Conclusie

Uit de analyse, bij de voorspanstreng met een recht kabelverloop, is gebleken dat een toename van de lengte zorgt voor een grotere onderlinge verplaatsing tussen voorspanstreng en omhulling en hierdoor ontstaat meer wrijving bij langere voorspanstrengen.

Bij de analyse van de voorspanstreng met een gekromd kabelverloop is opgemerkt dat een toename van de som van doorlopen hoek niet een toename van de wrijving oplevert, maar juist een afname.

In de huidige rekenregel is er een verhouding tussen lengte en som van doorlopen hoek. De lengte is in mindere mate van invloed op de wrijving, deze wordt namelijk vermenigvuldigd met de waarde voor het Wobble-effect. Uit de metingen is gebleken dat de invloed van de lengte groter is dan de invloed van de som van doorlopen hoek op de totale wrijving.

## 7.6. Invloed fabrikant

### 7.6.1. Inleiding

Tijdens de laboratoriummetingen is gebleken dat er een verschil bestaat tussen de wrijvingscoëfficiënten van de onderzochte voorspanstrengen van de verschillende fabrikanten. Om dit verder te onderzoeken zijn naast de laboratoriummetingen ook praktijkmetingen uitgevoerd. Er is gemeten bij voorspanstrengen met een recht en gekromd kabelverloop.

### 7.6.2. Resultaten

#### 7.6.2.1. Recht kabelverloop

In tabel 7-17 staan de wrijvingsverliezen van de voorspanstrengen van twee fabrikanten. De lengte is 49.7 meter en de diameter 12.9 mm.

Tabel 7-17 Wrijvingsverlies: fabrikant varieert, lengte 49.7 meter, diameter 12.9 mm

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Wrijvingsverlies [kN]	Wrijvingsverlies [kN/m]
Nedri	49.7	12.9	7	0.14
Nedri	49.7	12.9	8	0.16
Nedri	49.7	12.9	10	0.20
Siderurgica	49.7	12.9	13	0.26
Siderurgica	49.7	12.9	14	0.28
Siderurgica	49.7	12.9	16	0.32

#### 7.6.2.2. Gekromd kabelverloop

In tabel 7-18 staan de wrijvingsverliezen van de voorspanstrengen van twee fabrikanten. De lengte is 49.7 meter en de diameter 12.9 mm. De som van doorlopen hoeken zijn allemaal 2.48 radiaal.

Tabel 7-18 Wrijvingsverlies: fabrikant varieert, som doorlopen hoek 2.48 rad, lengte 49.7 meter, diameter 12.9 mm

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Som van doorlopen hoek [rad]	Wrijvingsverlies [kN]	Wrijvingsverlies [kN/m]
Nedri	49.7	12.9	2.48	20	0.40
Nedri	49.7	12.9	2.48	21	0.42
Siderurgica	49.7	12.9	2.48	22	0.44
Siderurgica	49.7	12.9	2.48	23	0.46

### 7.6.3. Analyse

#### 7.6.3.1. Recht kabelverloop

In tabel 7-19 zijn de gemiddelde wrijvingsverliezen opgesomd.

Tabel 7-19 Gemiddelde wrijvingsverliezen in relatie tot fabrikant

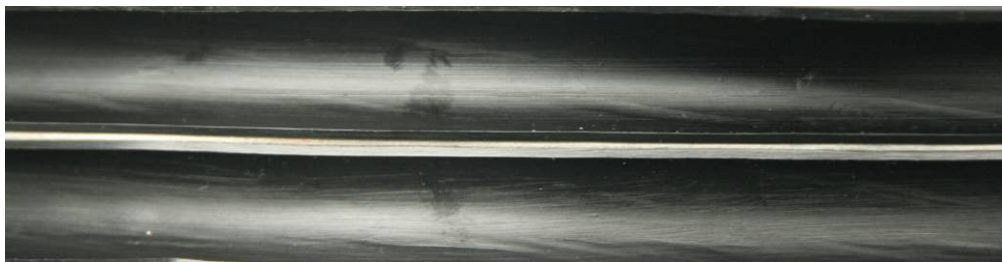
Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Gemiddeld wrijvingsverlies [kN]	Theoretisch wrijvingsverlies [kN]
Nedri	49.7	12.9	8.3	22.7
Siderurgica	49.7	12.9	14.3	22.7

De aangebrachte voorspankracht is bij beiden gelijk aan elkaar. Bij Nedri is er sprake van relatief minder wrijvingsverlies.

De lengte en diameter van beide fabrikanten zijn gelijk aan elkaar. De oorzaak van de verschillen in wrijvingsverlies moeten gezocht worden in ruwheid van de binnenzijde van de omhulling. Elke voorspanstreng moet voldoen aan de randvoorwaarden met bijbehorende bandbreedte.

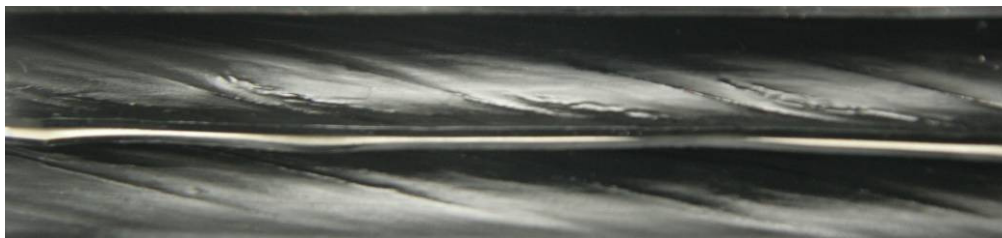
De binnenzijde van de omhulling kan een aanknopingspunt zijn. Inzoomen op de omhulling laat duidelijk de afdruk aan de binnenzijde van de voorspanstreng zien bij Siderurgica terwijl bij de omhulling van Nedri nauwelijks een afdruk zichtbaar is. Beide omhullingen zijn hieronder weergegeven.

In figuur 7.12 is de binnenzijde van de omhulling van Nedri.



Figuur 7.12 Binnenzijde omhulling Nedri

In figuur 7.13 is de binnenzijde van de omhulling van Siderurgica te zien.



Figuur 7.13 Binnenzijde omhulling Siderurgica

De oorzaak van de verschillen in wrijvingsverlies kunnen te wijten zijn aan de oneffenheden van de binnenzijde van de omhulling. Bij de laboratoriummetingen zijn de eigenschappen van de voorspanstreng onderzocht.

In tabel 7-20 zijn de resultaten van de laboratoriummeting weergegeven.

Tabel 7-20 Resultaten laboratoriumonderzoek

Parameters	Onderzocht	Wrijvingscoëfficiënt
Fabrikant	Nedri	0.025
	Siderurgica	0.035

De oorzaak van het verschil in wrijvingsverlies bij voorspanstrengen met een recht kabelverloop valt te wijten aan het feit dat de ruwheid van de omhulling van de voorspanstreng bij de Siderurgica groter is dan bij de Nedri. De wrijvingscoëfficiënt heeft een hogere waarde bij Siderurgica. Dit is visueel te zien in figuur 7.12 en figuur 7.13 en onderbouwd met de laboratoriummeting.

### 7.6.3.2. Gekromd kabelverloop

In tabel 7-21 zijn de gemiddelde wrijvingsverliezen opgesomd.

Tabel 7-21 Gemiddelde wrijvingsverliezen in relatie tot fabrikant

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Gemiddeld wrijvingsverlies [kN]	Theoretisch wrijvingsverlies [kN]
Nedri	49.7	12.9	20.5	43.8
Siderurgica	49.7	12.9	22.5	43.8

Bij de voorspanstrengen met een gekromd kabelverloop is het verschil tussen beiden minimaal. De invloed van de binnenkant van de omhulling valt hiermee weg of wordt minder belangrijk.

Hypothese 1: Door het gekromde kabelverloop ontstaat een normaalkracht ter plaatse van de krommingen van de voorspanstreng. De rotatie van de voorspanstreng wordt door de normaalkracht beperkt. Door de rotatiebeperking schuurt de voorspanstreng tegen de binnenzijde van de omhulling, waardoor de ruwheid wordt verminderd. Het wrijvingsverlies neemt daardoor af tot dezelfde waarde als bij voorspanstrengen met een nagenoeg gladde omhulling.

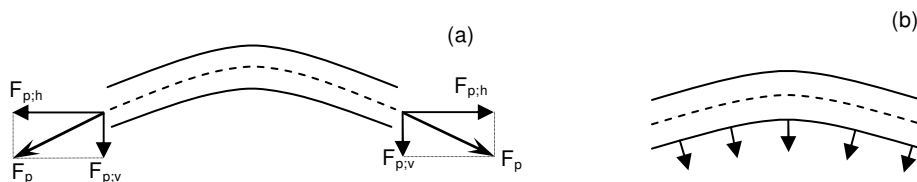
De hypothese is onderverdeeld in twee delen:

01. Normaalkracht verhindert dat de voorspanstreng roteert;
02. Door geen rotatie van de voorspanstreng, schuurt de voorspanstreng tegen de binnenzijde van de omhulling af, wat minder wrijvingsverlies oplevert.

#### 01. Normaalkracht verhindert rotatie

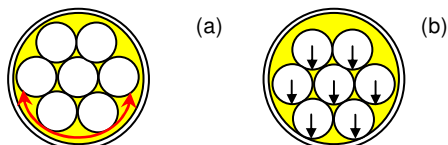
Door de kromming in het kabelverloop van de voorspanstreng ontstaat, door het aanbrengen van de voorspankracht, naast een normaalkracht ook een normaalkracht in de voorspanstreng.

De krachten ontstaan door het gekromde kabelverloop zijn weergegeven in figuur 7.14.



Figuur 7.14 Krachten bij gekromd kabelverloop (a) / Optredende normaalkrachten (b)

In figuur 7.15 is een dwarsdoorsnede van de voorspanstreng weergegeven.



Figuur 7.15 Dwarsdoorsnede voorspanstreng voor spannen (a) / na spannen (b)

De voorspanstreng zal, ten gevolge van de normaalkracht, vast gaan klemmen in de omhulling en dan met name waar de oppervlakken ruw zijn. De ruwe oppervlakken worden ingedrukt en de voorspanstreng kan niet meer roteren tijdens het spannen.

## 02. Slijtage binnenzijde omhulling

Tijdens de laboratoriumonderzoeken is gebleken dat de voorspanstreng draait tijdens spannen. Dit is geconstateerd bij voorspanstrengen met een recht kabelverloop. Om te bepalen of de rotatie van de voorspanstreng invloed heeft op de wrijvingscoëfficiënt, zijn hier metingen naar verricht.

De metingen zijn weergegeven in figuur 7.16.



Figuur 7.16 Metingen trekkracht rotatievrijheid

Bij de voorspanstreng waar geen rotatie mogelijk is, zijn maximale waarden zichtbaar in het krachtverloop. De afstand tussen de onderlinge pieken zijn gelijk aan de slaglengte van de voorspanstreng. Naarmate de voorspanstreng verder door de omhulling wordt getrokken nemen de piekwaarden af. Dit duidt op het afschuren van de oneffenheden aan de binnenzijde van de omhulling.

Uit de laboratoriummetingen is gebleken dat bij voorspanstrengen waar geen rotatie mogelijk is minder wrijving optreedt.

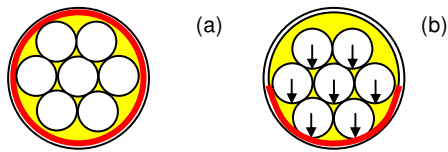
Er kan aangenomen worden dat bij een gekromde voorspanstreng de ruwheid niet een beperkende factor is, correct is.

Er kan ook nog een tweede hypothese worden omschreven.

**Hypothese 2:** Bij de kromming van de voorspanstreng is er plaatselijk minder wrijvingsoppervlak tussen omhulling en voorspanstreng. Hierdoor is de invloed van de ruwheid van de omhulling minder groot.

Tijdens het aanbrengen van de voorspankracht wordt de voorspanstreng bij de kromming van de voorspanstreng tegen de omhulling aangetrokken.

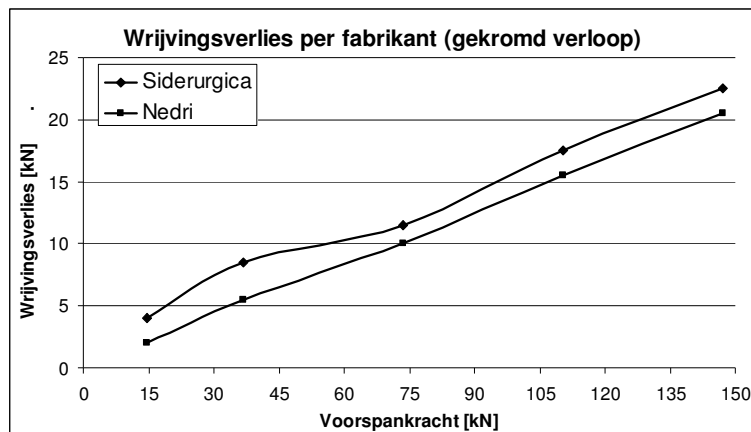
In figuur 7.17 is een dwarsdoorsnede van de voorspanstreng weergegeven.



Figuur 7.17 Wrijvingsoppervlak recht kabelverloop (a) / gekromd kabelverloop (b)

Het wrijvingsoppervlak is bij het gekromde kabelverloop minder groot dan bij het rechte kabelverloop. Door het geringere wrijvingsoppervlak heeft de ruwheid van de omhulling een minder grote invloed.

Er zijn ook resultaten van het wrijvingsverlies tijdens het voorspannen van de voorspanstreng. De relatie van het wrijvingsverlies ten opzichte van de aangebrachte voorspankracht voor beide fabrikanten zijn weergegeven in figuur 7.18. De wrijvingsverliezen zijn gemeten bij voorspanstrengen met een gekromd kabelverloop.



Figuur 7.18 Wrijvingsverlies t.o.v. aangebrachte actieve voorspankracht

Uit deze metingen blijkt dat het verschil in wrijvingsverlies tussen beide fabrikanten tijdens de hele spanfase gelijk blijft. Dit betekent dat de invloed gelijk vanaf het begin van het voorspannen plaatsvindt en onafhankelijk is van toename van de voorspankracht.

Hieruit kan worden geconcludeerd dat het verschil van ruwheid van de omhulling in de eerste spanfase al wordt gecompenseerd. De tweede hypothese is daarmee ook aannemelijk.

### 7.6.3.3. Conclusie

De ruwheid van de omhulling van de voorspanstreng is bij een recht kabelverloop van invloed op het totale wrijvingverlies. De resultaten van de laboratoriummetingen hebben dit aangetoond en zijn een goede indicatie om deze invloed mee te nemen.

De ruwheid van de omhulling van de voorspanstreng is bij een gekromd kabelverloop minder van invloed. De normaalkracht in combinatie met rotatiebeperking en de verlaging van het wrijvingsoppervlak kunnen beiden de invloed van de ruwheid verlagen.

Het verschil van de fabrikanten is nauwelijks een invloed op het wrijvingsverlies.

## 7.7. Conclusie

Nu de verschillende invloeden geanalyseerd zijn, is te bepalen welke invloeden meegenomen kunnen worden bij de berekening van de wrijvingsverliezen. In tabel 7-22 zijn de invloeden die onderzocht zijn, opgesomd.

Tabel 7-22 Invloed op wrijving

Invloedsfactor	Recht kabelverloop	Gekromd kabelverloop
Diameter	Ja	Ja
Lengte	Ja	Ja
Som doorlopen hoek	n.v.t.	Ja
Fabrikant	Ja	Nee

De enige invloedsfactor die niet meegenomen moet worden, is de invloed van de fabrikant. De rechte voorspanstreng wordt in gebruikelijke situaties niet toegepast. Bij een gekromd kabelverloop is de invloed minimaal. De andere factoren hebben allemaal een wel invloed op het uiteindelijke wrijvingsverlies en moeten allemaal meegenomen worden in de berekening.

## 7.8. Verlenging

### 7.8.1. Inleiding

De controle van de verlenging is een gebruikelijke methode om te bepalen of de juiste voorspankracht is aangebracht. De verlenging kan met behulp van de Wet van Hooke worden uitgerekend. Tijdens het voorspannen van de voorspanstrengen is er vaak een verschil tussen theoretisch bepaalde en gemeten verlenging te herkennen.

In de volgende paragraaf is bekeken of de verlenging bij de praktijkmetingen nog veel afwijken. Als er afwijkingen zijn, is ook gekeken wat de mogelijke oorzaken zijn.

### 7.8.2. Resultaten

#### 7.8.2.1. Recht kabelverloop

In tabel 7-23 zijn de verlengingen te zien van voorspanstrengen met de verschillende diameters en lengte van 49.7 meter.

Tabel 7-23 Verlenging: diameter varieert, lengte 49.7 meter, fabrikant Nedri

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Verlenging [mm]
Nedri	49.7	12.9	368
Nedri	49.7	12.9	377
Nedri	49.7	12.9	387
Nedri	49.7	15.7	392
Nedri	49.7	15.7	399
Nedri	49.7	15.7	407



In tabel 7-24 zijn de verlengingen opgeschreven van voorspanstrengen met een diameter van 12.9 mm en een lengte van 49.7 meter en 82.4 meter.

Tabel 7-24 Verlenging: lengte varieert, diameter 12.9 mm, fabrikant Nedri

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Verlenging [mm]
Nedri	49.7	12.9	368
Nedri	49.7	12.9	377
Nedri	49.7	12.9	387
Nedri	82.4	12.9	Niet gemeten
Nedri	82.4	12.9	Niet gemeten
Nedri	82.4	12.9	Niet gemeten

In tabel 7-25 zijn de verlengingen weergegeven van de voorspanstrengen met een diameter van 15.7 mm en een lengte van 49.7 meter en 66.4 meter.

Tabel 7-25 Verlenging: lengte varieert, diameter 15.7 mm, fabrikant Nedri

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Verlenging [mm]
Nedri	49.7	15.7	392
Nedri	49.7	15.7	399
Nedri	49.7	15.7	407
Nedri	66.4	15.7	454

In tabel 7-26 zijn de verlengingen van de voorspanstrengen van beide fabrikanten weergegeven.

Tabel 7-26 Verlenging: fabrikant varieert, lengte 49.7 meter, diameter 12.9 mm

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Verlenging [mm]
Nedri	49.7	12.9	368
Nedri	49.7	12.9	377
Nedri	49.7	12.9	387
Siderurgica	49.7	12.9	372
Siderurgica	49.7	12.9	380
Siderurgica	49.7	12.9	381

### 7.8.2.2. Gekromd kabelverloop

In tabel 7-27 zijn de verlengingen te zien van voorspanstrengen met de verschillende diameters en een lengte van 49.7 meter.

Tabel 7-27 Verlenging: diameter varieert, lengte 49.7 meter, fabrikant Nedri

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Kromming [rad]	Verlenging [mm]
Nedri	49.7	12.9	2.48	366
Nedri	49.7	12.9	2.48	369
Nedri	49.7	15.7	2.83	393
Nedri	49.7	15.7	2.83	406

In tabel 7-28 zijn de verlengingen opgeschreven van voorspanstrengen met een diameter van 12.9 mm en een lengte van 49.7 meter en 82.4 meter. De verlenging van de voorspanstreng met een lengte van 82.4 meter is niet gemeten.

Tabel 7-28 Verlenging: lengte varieert, diameter 12.9 mm, fabrikant Nedri

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Kromming [rad]	Verlenging [mm]
Nedri	49.7	12.9	2.48	366
Nedri	49.7	12.9	2.48	369
Nedri	82.4	12.9	8.19	Niet gemeten
Nedri	82.4	12.9	8.19	Niet gemeten
Nedri	82.4	12.9	8.19	Niet gemeten
Nedri	82.4	12.9	8.19	Niet gemeten

In tabel 7-29 zijn de verlengingen weergegeven van de voorspanstrengen met een diameter van 15.7 mm en een lengte van 49.7 meter en 66.4 meter.

Tabel 7-29 Verlenging: lengte varieert, diameter 15.7 mm, fabrikant Nedri

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Kromming [rad]	Verlenging [mm]
Nedri	49.7	15.7	2.83	393
Nedri	49.7	15.7	2.83	406
Nedri	66.4	15.7	1.25	427
Nedri	66.4	15.7	1.25	437
Nedri	66.4	15.7	1.25	445
Nedri	66.4	15.7	1.25	446

In tabel 7-30 zijn de verlengingen van de voorspanstrengen terug te vinden van de voorspanstrengen met een gelijk kabelverloop, waarbij twee voorspanstrengen korter zijn.

Tabel 7-30 Verlenging: lengte varieert, diameter 15.7 mm, fabrikant Nedri

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Kromming [rad]	Verlenging [mm]
Nedri	46.8	15.7	2.65	367
Nedri	46.8	15.7	2.65	370
Nedri	49.7	15.7	2.83	393
Nedri	49.7	15.7	2.83	406

In tabel 7-31 zijn de verlengingen van de voorspanstrengen van beide fabrikanten opgesomd. Van beide fabrikanten zijn twee metingen verricht.

Tabel 7-31 Verlenging: fabrikant varieert, lengte 49.7 meter, diameter 12.9 mm

Fabrikant	Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	Kromming [rad]	Verlenging [mm]
Nedri	49.7	12.9	2.48	366
Nedri	49.7	12.9	2.48	369
Siderurgica	49.7	12.9	2.48	366
Siderurgica	49.7	12.9	2.48	367

### 7.8.3. Beschouwing verlenging

#### 7.8.3.1. Recht kabelverloop

In tabel 7-32 zijn de verschillende gemeten en berekende verlengingen naast elkaar gezet. De gemeten verlenging is het gemiddelde van de afzonderlijk gemeten verlengingen weergegeven. Bij de berekening volgens de Wet van Hooke wordt uitgegaan van een lineair verloop.

Tabel 7-32 Verlenging voorspanstreng per situatie

Situatie	Lengte voorspanstreng [mm]	Verlenging [mm]		
		Gemeten	Wet van Hooke	Verschil
1.	49.7	378	337	+ 50
2.	49.7	377	337	+ 49
3.	49.7	399	337	+ 63
4.	66.4	454	412	+ 42

De verlenging berekent met de Wet van Hooke en gemeten in de praktijk zijn weergegeven in tabel 7-32. De gemeten en berekende verlengingen zijn niet gelijk aan elkaar. Voor alle situaties telt dat de verlenging volgens de Wet van Hooke kleiner is dan daadwerkelijk gemeten.

Situaties 1 t/m 3 zijn gemeten bij hetzelfde project. Situatie 4 is bij een andere praktijkmeting gemeten.

Oorzaak van het verschil tussen gemeten verlenging en berekende verlenging kan te wijten zijn aan de volgende onderdelen:

01. Afwijkende voorspankracht;
  02. Afwijkingen in oppervlakte voorspanstreng;
  03. Elasticiteitsmodulus bepaald op een blanke voorspanstreng, niet een omhulde voorspanstreng;
  04. Niet-lineair verlopen van de voorspankracht.
01. Bij de berekening van de verlenging wordt een aanname gedaan voor het optredende wrijvingsverlies. Als de optredende wrijving lager is dan berekend, is de gemiddelde voorspankracht groter. Bij een hogere gemiddelde voorspankracht zal de verlenging ook groter zijn.
02. Bij de berekening van de verlenging is het gebruikelijk om een gemiddelde standaard oppervlak van de voorspanstreng van  $100 \text{ mm}^2$  (bij  $\varnothing 12.9 \text{ mm}$ ) mee te nemen, terwijl het oppervlak varieert van  $98 \text{ mm}^2$  tot  $101 \text{ mm}^2$  (metingen fabrikant). Deze factor heeft een invloed van  $\pm 2.0\%$ .
03. De elasticiteitsmodulus wordt gemeten op een blanke voorspanstreng, voordat het extrusieproces heeft plaatsgevonden. De temperatuurswisseling door het extrusieproces tijdens het productieproces kan een verschil in elasticiteitsmodulus veroorzaken.

De fabrikant heeft metingen verricht om te bepalen of de temperatuurswisseling tijdens het extrusieproces een invloedsfactor kan zijn.

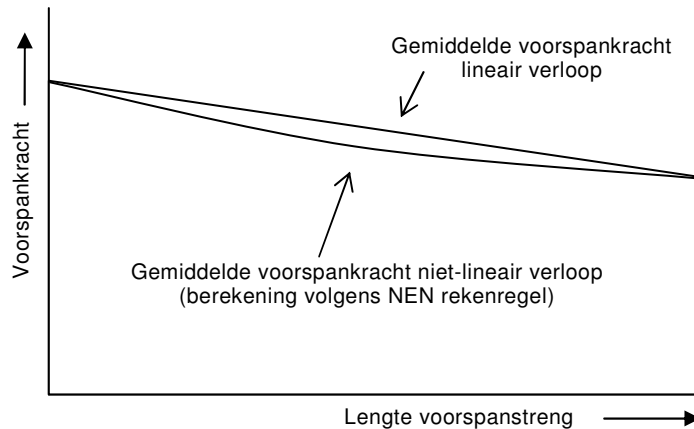
De resultaten van de voorspanstrengen:

Type streng	Minimale Waarde	Maximale waarde	Gemiddelde
Blank	199	201	200
Omhuld	197	200	199

Uit onderzoek van de fabrikant is gebleken dat de temperatuurswisseling tijdens het extrusieproces een betrekkelijk kleine invloed heeft op de uiteindelijke elasticiteitsmodulus. De invloed op de verlenging is maximaal  $+ 0.5 \%$ .

04. Bij de berekening van de verlenging wordt er vanuit gegaan dat de voorspankracht volgens een lineair verloop verloopt. De gemiddelde voorspankracht is gebaseerd op de aangebrachte voorspankracht en de aangebrachte voorspankracht verminderd met het wrijvingsverlies. Er bestaat een kans dat de voorspankracht niet-lineair verloopt. Nadat de statische wrijving overwonnen is, neemt de wrijving af. Dit is ook te terug te vinden bij de laboratoriummetingen (hoofdstuk 6). Hierdoor bestaat een kans dat de voorspankracht niet-lineair verloopt.

In figuur 7.19 is weergegeven wat de voorspankracht is bij een lineair en niet-lineair verloop.



Figuur 7.19 Verloop voorspankracht

Volgens de rekenregel van de NEN verloopt de voorspankracht niet-lineair. Als de voorspankracht niet-lineair verloopt, is de gemiddelde voorspankracht lager en is de berekende verlenging daardoor ook kleiner.

Al de oorzaken kunnen invloed hebben op het uiteindelijke verschil tussen berekende en gemeten verlenging. Elke oorzaak heeft een kleine bijdrage in het totale resultaat. De gemiddelde waarden voor oppervlak voorspanstreng en elasticiteitsmodulus voorspanstreng kunnen gewoon gehanteerd blijven.

### 7.8.3.2. Gekromd kabelverloop

In tabel 7-33 zijn de verschillende gemeten en berekende verlengingen naast elkaar gezet. Voor de gemeten verlenging is het gemiddelde genomen van de afzonderlijke waarden. Bij de berekening volgens de Wet van Hooke wordt wederom uitgegaan van een lineair verloop.

Tabel 7-33 Verlenging voorspanstreng per situatie

Situatie	Lengte Voorspanstreng [m]	Verlenging [mm]		
		Gemeten	Wet van Hooke	Vershil
1.	49.7	367	311	+ 56
2.	49.7	368	311	+ 57
3.	46.8	369	309	+ 60
4.	49.7	400	307	+ 93
5.	66.4	439	396	+ 43

Ook bij de voorspanstrengen met een gekromd kabelverloop zijn er afwijkingen te zien bij de situaties 1 t/m 4. Alle vier de situaties zijn gemeten bij hetzelfde project. Bij situatie 5 is het verschil tussen gemeten en berekend met behulp van de Wet van Hooke minimaal.

Oorzaak van het verschil tussen gemeten verlenging en berekende verlenging kan te wijten zijn aan dezelfde onderdelen als bij het rechte kabelverloop.

#### 7.8.4. Conclusie

Alle metingen tonen aan dat de gemeten verlenging altijd meer is dan vooraf berekend. Het verschil tussen gemeten en berekend loopt uiteen van 42 mm meer tot 93 mm meer. Hiermee is aangetoond dat er niet alleen een verschil bestaat tussen de berekende en gemeten waarden bij de voorspankracht, maar dat ook bij de verlenging het beeld bevestigd wordt.

Er zijn een aantal oorzaken gevonden waarom de berekende en gemeten verlenging niet op elkaar aansluiten. Belangrijkste oorzaak is het verschil in gemeten en berekende voorspankracht. Daarnaast is het niet-lineair verlopen van de voorspankracht ook nog een mogelijke oorzaak.

## 8. Discussie

### 8.1. Inleiding

In de voorgaande hoofdstukken zijn conclusies getrokken naar aanleiding van metingen en analyses. Uit het laboratoriumonderzoek is gebleken dat de versnelling tijdens het spannen, diameter van de voorspanstrengen, rotatievrijheid en ruwheid van omhulling van invloed zijn op de wrijving.

Uit de oriënterende metingen is gebleken dat de factoren lengte, hoekverdraaiing en diameter van de voorspanstreng van invloed zijn op de wrijving. Uit de metingen is verder gebleken dat de ruwheid aan de binnenzijde van de omhulling nagenoeg geen rol speelt.

### 8.2. Basisformule

De modelvorming  $\Delta F_p = F_p \cdot (1 - e^{-\mu\phi})$  is voortgekomen uit het oplossen van een differentiaalvergelijking. Bij de veronderstelling dat de factoren die een invloed hebben op het wrijvingsverlies zijn omschreven als waarde 'w', kan de formule worden vastgelegd als:

$$\Delta F_p = F_p \cdot (1 - e^{-w}) \quad \{8.1\}$$

Uit de literatuur is gebleken dat alle onderzoeken zijn uitgegaan van deze formule. Een uitwerking van de 'w' uit de formule, komt voort uit de onderzoeken en analyses die zijn uitgevoerd.

De formule is ook voor dit onderzoek gebruikt als uitgangssituatie. De literatuurstudie, laboratoriummetingen en praktijkmetingen hebben geen aanleiding gegeven om af te wijken van de huidige formule voor het berekenen van de wrijving. De 'w' kan voor de verschillende praktijkmetingen worden vastgesteld aan de hand van het wrijvingsverlies en de aangebrachte voorspankracht, middels:

$$\frac{\Delta F_p}{F_p} = (1 - e^{-w}) \quad \{8.2a\}$$

$$\left(1 - \frac{\Delta F_p}{F_p}\right) = e^{-w} \quad \{8.2b\}$$

$$\ln\left(1 - \frac{\Delta F_p}{F_p}\right) = -w \quad \{8.2c\}$$

## 8.3. Modelvorming

### 8.3.1. Recht kabelverloop

Met behulp van formule 8.2c kan voor alle praktijkmetingen de  $w$  worden bepaald. In tabel 8-1 is voor de praktijkmetingen met een recht kabelverloop de  $w$  uitgerekend.

Tabel 8-1 Waarde  $w$  bij een recht kabelverloop

Situatie	Lengte voorspanstreng [m]	Wrijvingsverlies [kN]	Voorspankracht [kN]	$w$
I	49.7	11.3	147	0.080
II	49.7	8.0	220	0.037
III	66.4	17.0	207	0.086
IV	82.4	24.7	152	0.177

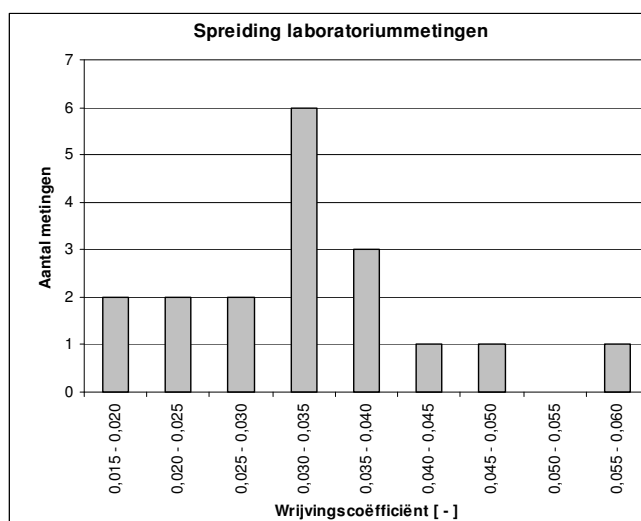
Bij situatie I zijn de praktijkmetingen van fabrikant Nedri en Siderurgica samengevoegd tot één gemiddelde. Er is geconcludeerd dat de invloed van de binnenkant van de omhulling een minimale invloed heeft op de wrijving en daarom zijn deze twee samengevoegd. Bij de overige situaties is alleen fabrikant Nedri gemeten en bestaat het gemiddelde daardoor ook uit alleen de metingen van Nedri voorspanstrengen.

#### 8.3.1.1. Wrijvingscoëfficiënt

Tijdens het laboratoriumonderzoek (zie Hoofdstuk 6) is de wrijvingscoëfficiënt bepaald. Uit de parameterstudie van het laboratoriumonderzoek is gebleken dat de ruwheid aan de binnenzijde van de omhulling, de diameter van de voorspanstreng, de versnelling en de aangebrachte normaalkracht een minimale invloed hebben op de wrijving.

De rotatievrijheid van de voorspanvizel heeft wel een invloed op de wrijving. Bij een rotatiebeperking van de voorspanvizel is de wrijving lager dan de overige laboratoriummetingen, respectievelijk 0.019 (rotatiebeperking) en 0.036 (rotatievrij).

De spreiding van alle laboratoriummetingen zijn weergegeven in figuur 8.1.



Figuur 8.1 Spreiding wrijvingscoëfficiënt laboratoriummetingen

Met behulp van de student t-verdeling is de 5%-overschrijding en 5%-onderschrijding van de wrijvingscoëfficiënt bepaald:

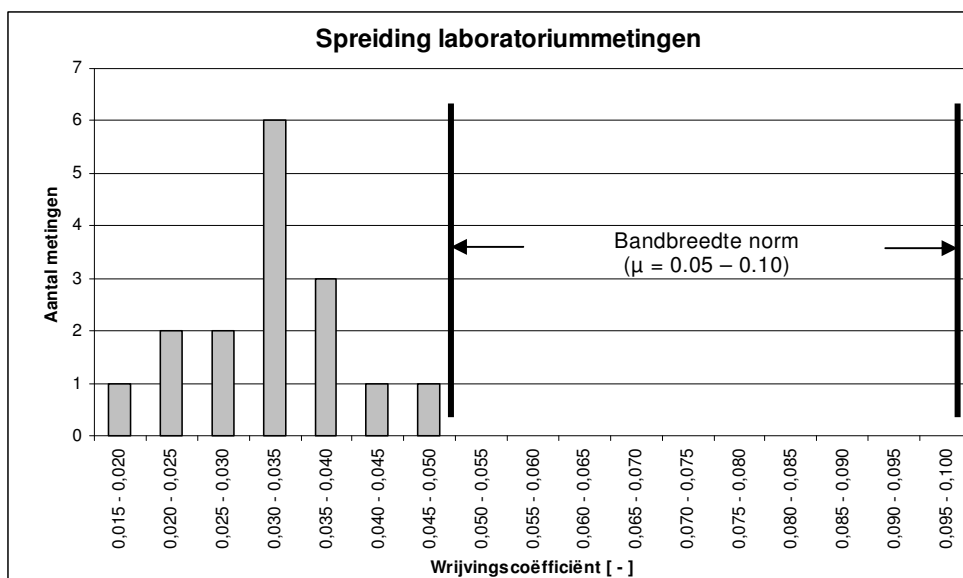
- gemiddelde waarde van de metingen 0.0332
- standaarddeviatie van de metingen 0.0094
- aantal metingen 18
- 5%-onderschrijdingskans 0.0285
- 5%-overschrijdingskans 0.0379

De minimale waarden van de wrijvingscoëfficiënt zijn gemeten bij een rotatiebeperking van de voorspanvijzel. De aangenomen rotatiebeperking is niet realistisch voor de praktijk, een vijzel zal namelijk altijd deels vrij roteren met een mogelijk beperkte rotatieverhinderling.

De maximale waarde van de wrijvingscoëfficiënt is gemeten bij een hoge spansnelheid (1000 mm/min). De hoge spansnelheid is niet representatief voor de praktijk en wordt derhalve achterwege gelaten.

Indien de minimale en maximale waarden niet worden meegenomen, is de 5%-overschrijding en 5%-onderschrijding:

- gemiddelde waarde van de metingen 0.0326
- standaarddeviatie 0.0069
- aantal metingen 16
- 5%-onderschrijdingskans 0.0289
- 5%-overschrijdingskans 0.0363



Figuur 8.2 Spreading wrijvingscoëfficiënt laboratoriummetingen verminderd met extremen

Voor het uiteindelijke model wordt voor de wrijvingscoëfficiënt de waarde van de 5%-overschrijding aangehouden. Dit betekent een wrijvingscoëfficiënt van 0.036. De kans dat de wrijvingscoëfficiënt hoger zal zijn dan de aangenomen 0.036 wordt hiermee beperkt.



De factoren die van invloed zijn op de wrijvingscoëfficiënt zijn niet afzonderlijk meegenomen, omdat dan geen eenduidig model kan worden geformuleerd. Er ontstaan dan namelijk, afhankelijk van de toe te passen voorspanstreng, verschillende getalswaarden voor de wrijvingscoëfficiënt.

Het onderzoek heeft zich echter beperkt tot enkele variabelen (twee diameters en twee fabrikanten). Hierdoor kan verder ook geen conclusie of modelvorming worden vastgesteld over de voorspanstrengen met een andere diameter of van een andere fabrikant.

### 8.3.1.2. Diameter

In de vorige paragraaf is gesteld dat de diameter van de voorspanstreng een minimale invloed heeft op de wrijvingscoëfficiënt. In tabel 8-2 zijn de bepaalde wrijvingscoëfficiënten tijdens de laboratoriummetingen weergegeven van de gemeten diameters. Bij de vaststelling van de wrijvingscoëfficiënt is er gekozen slechts één getal aan te houden voor de wrijvingscoëfficiënt. De diameter is hier dus niet in verrekend.

Tabel 8-2 Wrijvingscoëfficiënt laboratoriummetingen

Diameter	Wrijvingscoëfficiënt
12.9 mm	0.025
15.7 mm	0.033

Niet alleen tijdens de laboratoriummetingen, maar ook tijdens de praktijkmetingen is gebleken dat de diameter van de voorspanstreng wel degelijk een invloed heeft op de wrijving. In tabel 8-3 en tabel 8-4 zijn de metingen van de praktijkmetingen weergegeven.

Tabel 8-3 Wrijvingsverlies praktijkmetingen, recht kabelverloop

Diameter	Voorspankracht	Wrijvingsverlies	Procentueel
12.9 mm	147 kN	8.3 kN	5.6%
15.7 mm	220 kN	8.0 kN	3.6%

Tabel 8-4 Wrijvingsverlies praktijkmetingen, gekromd kabelverloop

Diameter	Voorspankracht	Wrijvingsverlies	Procentueel
12.9 mm	147 kN	20.5 kN	13.9%
15.7 mm	220 kN	18.5 kN	8.4%

Uit de analyse (zie Hoofdstuk 7.4) is gebleken dat de verhouding tussen omtrek en oppervlak van de voorspanstreng een goede indicatiefactor is om de diameter te verrekennen in de formule voor de bepaling van het wrijvingsverlies.

De formule hiervoor is  $\frac{\pi \times d}{A}$  {8.3}

Voor 12.9 mm  $\frac{\pi \times 12.9}{100} = 0.405$

Voor 15.7 mm  $\frac{\pi \times 15.7}{150} = 0.329$

Het meenemen van de invloed van de diameter van de voorspanstreng kan op twee manieren:

1. Voor beide diameters een andere wrijvingscoëfficiënt aanhouden;
2. Toevoegen van de diameter als vaste variabele aan het rekenmodel.

De laatste optie is de meest logische, omdat door het toevoegen van de diameter aan de formule slechts één getal voor de wrijvingscoëfficiënt meegenomen hoeft te worden. De formule 8.3 kan

omgeschreven worden naar de waarde:  $\frac{1}{d} \left( \frac{\pi d}{\frac{1}{4}\pi d^2} = \frac{d}{\frac{1}{4}d^2} \approx \frac{1}{d} \right)$ .

### 8.3.1.3. Wobble-effect

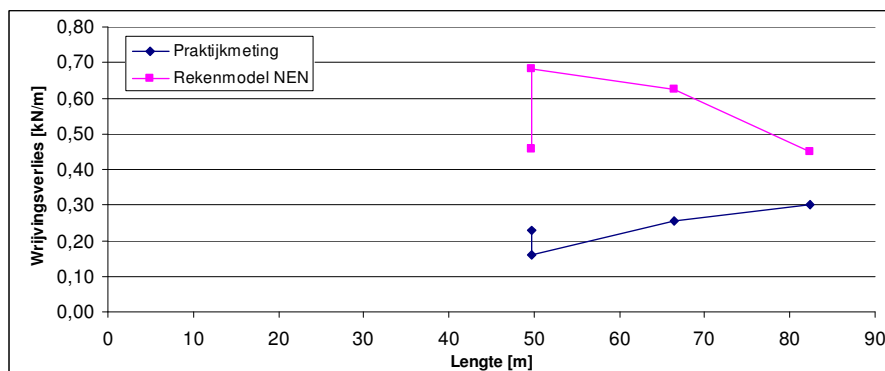
Het uitgevoerde kabelverloop zal niet gelijk zijn aan het berekende kabelverloop. Het in rekening brengen van het Wobble-effect zorgt ervoor dat deze imperfectie van het kabelverloop wordt verdisconteerd.

Door de lengte te vermenigvuldigen met het Wobble-effect kan deze invloed worden meegenomen over de gehele lengte van de voorspanstreng. In het huidige model wordt hier ook al rekening mee gehouden door de factor  $\varphi_1 \times x$ . In het verfijnde model wordt deze factor op dezelfde manier meegenomen, dus  $\varphi_1 \times x$ .

### 8.3.1.4. Lengte

Tijdens de analyse van de praktijkmetingen is gebleken dat de lengte van de voorspanstreng een grotere invloed heeft op het totale wrijvingsverlies dan in de huidige rekenregels wordt meegenomen.

In figuur 8.3 is het wrijvingsverlies per meter voorspanstreng weergegeven. De paarse lijn geeft het berekende wrijvingsverlies weer, de blauwe lijn het gemeten wrijvingsverlies.



Figuur 8.3 Vergelijk wrijvingsverlies berekend en gemeten

De oorzaak van deze grotere invloedsfactor is te wijten aan de grotere relatieve interne verplaatsing tussen voorspanstreng en omhulling naarmate de voorspanstreng langer wordt (zie hoofdstuk 6.5).

Uit onderzoek is gebleken dat indien de lengte in het model kwadratisch wordt meegenomen, de invloed van lengte overeenkomt met het gemeten wrijvingsverlies.

### 8.3.1.5. Model recht kabelverloop

Het model voor het rechte kabelverloop bestaat uit een aantal factoren die in de voorgaande paragrafen zijn besproken. De factoren zijn als volgt meegenomen in de berekening:

$$w = \mu \times \left( \varphi_1 \times l^2 \times \frac{1}{d} \right) \quad \{8.4\}$$

De wrijvingscoëfficiënt is van invloed op de volledige lengte en diameter van de voorspanstreng. De lengte van de voorspanstreng wordt verder nog vermenigvuldigd met het Wobble-effect om de toevallig optredende hoekverdraaiing in rekening te brengen.

De waarde van  $\varphi_1$  is berekend aan de hand van de resultaten van de praktijkmetingen. In tabel 8-5 zijn voor de metingen de  $\varphi_1$  uitgerekend met behulp van het verfijnde model en weergegeven.

Tabel 8-5 Waarde  $\varphi_1$  bij een recht kabelverloop

Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	w	$\varphi_1$
49.7	12.9	0.058	$0.012 \cdot 10^{-3}$
49.7	15.7	0.037	$0.007 \cdot 10^{-3}$
66.4	15.7	0.086	$0.008 \cdot 10^{-3}$
82.4	12.9	0.177	$0.009 \cdot 10^{-3}$

De maximale waarde van  $\varphi_1$  is gelijk aan  $0.01 \cdot 10^{-3}$  rad/m. Deze waarde wordt ook verder gebruikt in het model.

Ook de eenheid van de formule is nader bekeken. Het getal boven de natuurlijke logaritme moet als eenheid [rad] hebben. In formule 8.5 zijn de eenheden te zien van de formule. Hieruit blijkt dat de eenheid van de formule volstaat.

$$[rad] = [-] \times \left( [rad/m] \times [m^2] \times \frac{[-]}{[m]} \right) \quad \{8.5\}$$

Indien de diameter in mm wordt ingevuld dan wordt  $\varphi_1 = 0.01$ .

Het uiteindelijke model voor het rechte kabelverloop kan als volgt worden geformuleerd, gebaseerd op de basisformule en de factor w:

$$\Delta F_p = F_p \times \left( 1 - e^{-\mu \left( \varphi_1 \times l^2 \times \frac{1}{d} \right)} \right) \quad \{8.6\}$$

waarbij

$\mu = 0.036$

$\varphi_1 = 0.01$

$l =$  lengte voorspanstreng [m]

$d =$  diameter voorspanstreng [mm]

Tot slot zijn de gemeten voorspanverliezen en de berekende voorspanverliezen in tabel 8-6 uitgezet. Ook is een vergelijk gemaakt met de huidige rekenregel uit de NEN-norm (NEN 6720, art 4.1.4.5.).

Tabel 8-6 Vergelijk wrijvingsverliezen

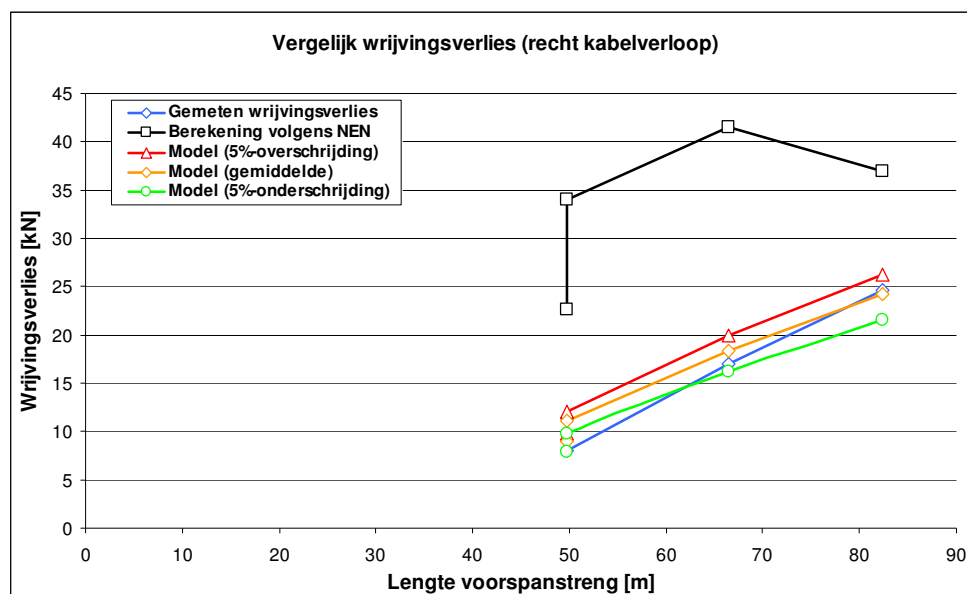
Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	$F_p$ [kN]	Gemeten $\Delta F_p$ [kN]	Nieuw model $\Delta F_p$ [kN]	NEN-norm $\Delta F_p$ [kN]
49.7	12.9	147	8.3	9.8	22.7
49.7	15.7	220	8.0	12.1	34.0
66.4	15.7	208	17.0	19.9	41.6
82.4	12.9	152	24.7	26.2	36.9

Verder zijn de wrijvingsverliezen bepaald waarbij voor de wrijvingscoëfficiënt zowel de onderschrijding, het gemiddelde als de overschrijding zijn meegenomen. Deze verliezen zijn te vinden in tabel 8-7.

Tabel 8-7 Vergelijk wrijvingsverliezen model, wrijvingscoëfficiënt varieert

Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	$F_p$ [kN]	Wrijvingscoëfficiënt		
			Onderschrijding $\Delta F_p$ [kN]	Gemiddelde $\Delta F_p$ [kN]	Overschrijding $\Delta F_p$ [kN]
49.7	12.9	147	7.9	9.0	9.8
49.7	15.7	220	9.8	11.1	12.1
66.4	15.7	208	16.2	18.3	19.9
82.4	12.9	152	21.5	24.2	26.2

Het wrijvingsverlies is uitgezet in figuur 8.4. Hier is te zien dat het nieuwe model een goede indicatie is voor de gemeten wrijvingsverliezen. De NEN-norm heeft bij alle metingen een grote overschatting van de wrijvingsverliezen.



Figuur 8.4 Vergelijk wrijvingsverlies recht kabelverloop

### 8.3.2. Gekromd kabelverloop

Voor het opstellen van het rekenmodel, is de formule  $\Delta F_p = F_p \cdot (1 - e^{-w})$  wederom gebruikt als basisformule. De waarde 'w' in de basisformule kan op een gelijke wijze worden bepaald als bij het rechte kabelverloop.

De resultaten van de oriënterende metingen en de waarde 'w' zijn weergegeven in tabel 8-8.

Tabel 8-8 Waarde w bij een gekromd kabelverloop

Situatie	Lengte voorspanstreng [m]	Wrijvingsverlies [kN]	Voorspankracht [kN]	Doorlopen hoek [rad]	w
I	49.7	20.5	147	2.48	0.150
II	49.7	18.5	220	2.83	0.088
III	66.4	20.3	207	1.25	0.103
IV	82.4	31.0	152	8.19	0.228

Het wrijvingsverlies van een voorspanstreng met een gekromd kabelverloop bestaat uit de invloed van de doorlopen hoek en de invloed van de lengte van de voorspanstreng. De invloed van de lengte van de voorspanstreng is in paragraaf 8.3.1 uitgewerkt.

Om de invloed van alleen de doorlopen hoek te bepalen, kan het gemeten wrijvingsverlies worden verminderd met het wrijvingsverlies ten gevolge van de lengte van de voorspanstreng, indien de diameter en lengte van de rechte en gekromde voorspanstreng gelijk zijn aan elkaar.

In tabel 8-9 zijn de resultaten weergegeven van de waarde w voor het totale wrijvingsverlies, de invloed van de lengte en de doorlopen hoek.

Tabel 8-9 Waarde w ten gevolge van wrijvingsoppervlak en doorlopen hoek

Situatie	Doorlopen hoek [rad]	w totaal	w lengte	w doorlopen hoek
I	2.48	0.150	0.080	0.070
II	2.83	0.088	0.037	0.051
III	1.25	0.103	0.086	0.018
IV	8.19	0.228	0.177	0.051

De resultaten tonen aan dat de som van doorlopen hoek in de huidige vorm een te groot aandeel heeft voor de bepaling van het uiteindelijke wrijvingsverlies. Uit onderzoek is gebleken dat indien de wortel van de som van doorlopen hoek wordt aangehouden de praktijkmetingen aansluiten op de berekende waarde van de wrijvingsverliezen.

Het uiteindelijke model resulteert als volgt:

$$\Delta F_p = F_{po} \times \left( 1 - e^{-\mu \left( \varphi_1 \times l^2 \times \frac{1}{d} + \sqrt{\varphi} \right)} \right) \quad \{8.7\}$$

Hierin is:

- $\mu$  = wrijvingscoëfficiënt tussen voorspanstreng en omhulling;
- $\varphi$  = som van de absolute waarden van de opeenvolgende richtingsveranderingen van de voorspanstreng over de afstand x [rad];
- $\varphi_1$  = coëfficiënt voor de "Wobble" [rad/m];
- l = lengte voorspanstreng [m];
- d = diameter toegepaste voorspanstreng [mm];
- $F_{po}$  = kracht in voorspanstreng direct na spannen [kN].

De waarde van  $\mu$  en  $\varphi_1$  zijn gebaseerd op de uitgevoerde laboratorium- en praktijkmetingen:

$$\mu = 0.036$$

$$\varphi_1 = 0.01$$

In tabel 8-10 zijn de resultaten te zien van de gemeten en berekende wrijvingsverliezen. De wrijvingsverliezen zijn berekend met de huidige rekenregel uit de NEN-norm (NEN 6720, art 4.1.4.5.) en het opgestelde model, formule 8.7.

Tabel 8-10 Vergelijk wrijvingsverliezen gekromd kabelverloop

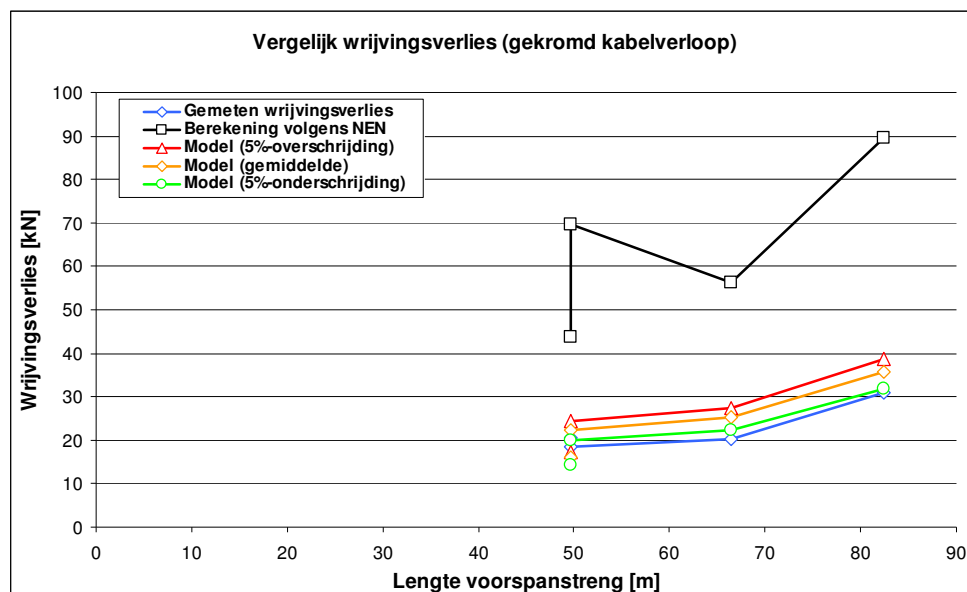
Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	$F_p$ [kN]	Gemeten $\Delta F_p$ [kN]	Nieuw model $\Delta F_p$ [kN]	NEN-norm $\Delta F_p$ [kN]
49.7	12.9	147	20.5	17.4	43.8
49.7	15.7	220	18.5	24.3	69.5
66.4	15.7	208	20.3	27.3	56.4
82.4	12.9	152	31.0	38.5	89.7

Verder zijn de wrijvingsverliezen bepaald waarbij voor de wrijvingscoëfficiënt zowel de onderschrijding, het gemiddelde als de overschrijding zijn meegenomen. Deze verliezen zijn te vinden in tabel 8-11.

Tabel 8-11 Vergelijk wrijvingsverliezen model, wrijvingscoëfficiënt varieert

Lengte voorspanstreng [m]	Diameter voorspanstreng [mm]	$F_p$ [kN]	Wrijvingscoëfficiënt		
			Onderschrijding $\Delta F_p$ [kN]	Gemiddelde $\Delta F_p$ [kN]	Overschrijding $\Delta F_p$ [kN]
49.7	12.9	147	14.1	16.0	17.4
49.7	15.7	220	19.8	22.4	24.3
66.4	15.7	208	22.3	25.2	27.3
82.4	12.9	152	31.9	35.7	38.5

De resultaten zijn uitgezet in figuur 8.5. De blauwe lijn is het wrijvingsverlies van de praktijkmetingen. De rode lijn is het wrijvingsverlies berekend met formule 8.7 en de zwarte lijn is de berekende wrijvingsverlies met behulp van NEN 6720. De groene en oranje lijn geven aan wat het wrijvingsverlies is indien wordt gerekend met een andere waarde voor de wrijvingscoëfficiënt (gemiddelde of 5%-onderschrijding).



Figuur 8.5 Vergelijk wrijvingsverlies gekromd kabelverloop

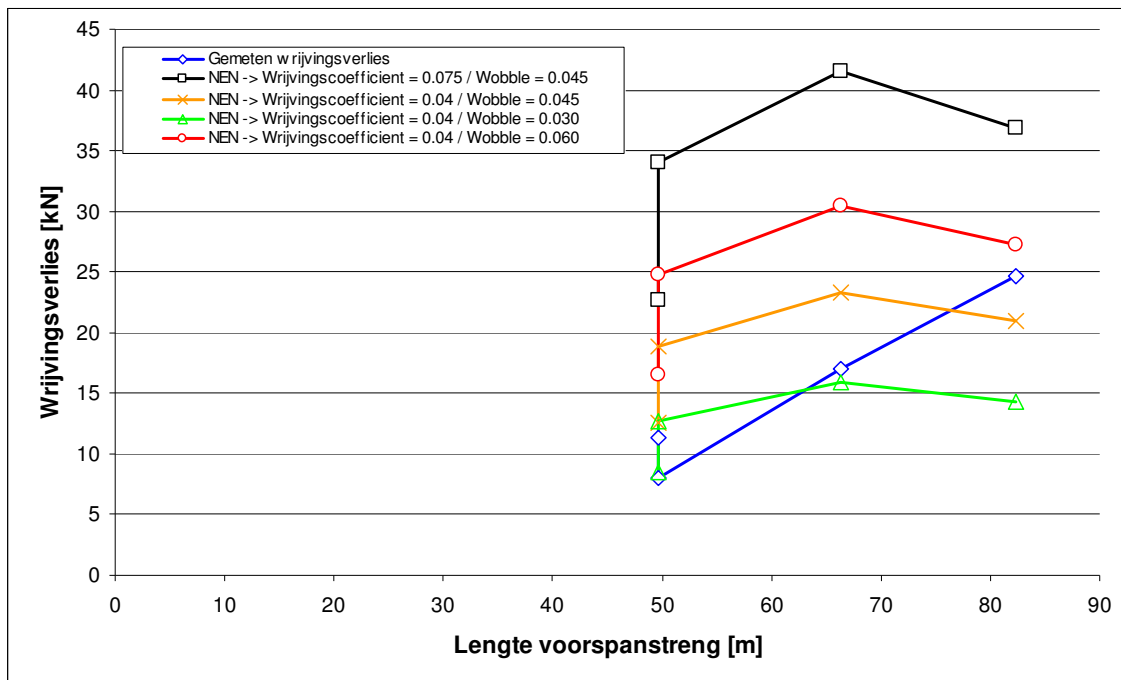
In figuur 8.5 is duidelijk te zien dat het model, volgens formule 8.7, een betere benadering geeft voor de gemeten wrijvingsverliezen.

## 8.4. Aanpassing huidig rekenmodel

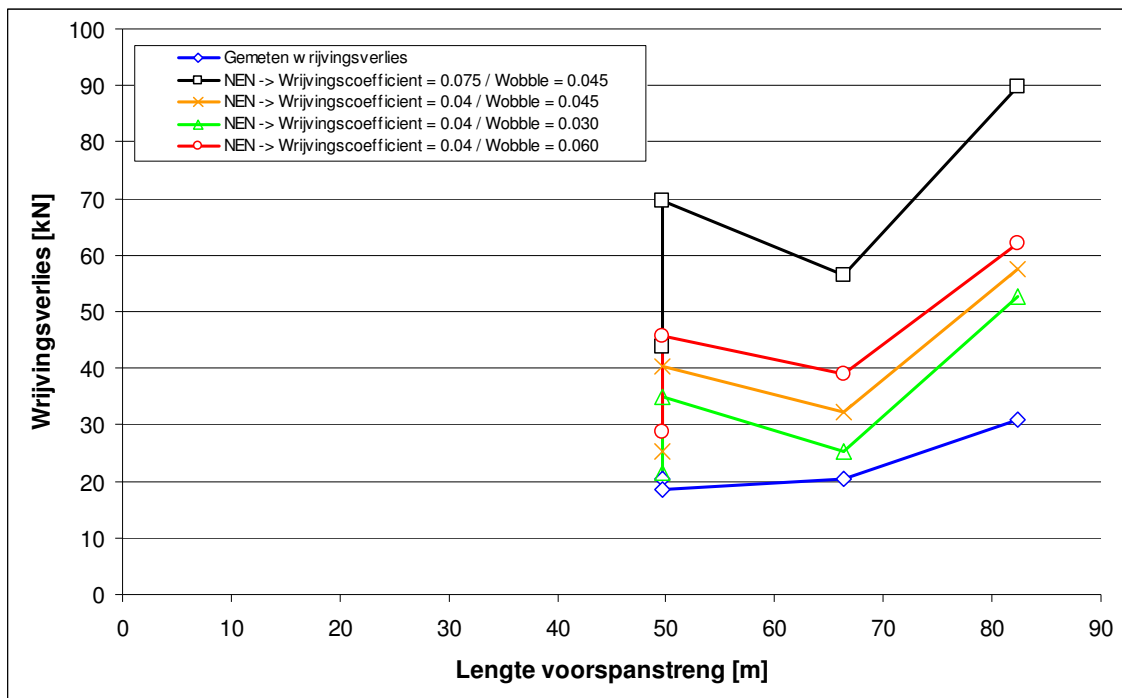
Het opgestelde model is slechts een verfijning op het huidige rekenmodel uit de NEN 6720. De gemeten wrijvingscoëfficiënt uit de laboratoriummetingen kan misschien als getalswaarde worden gebruikt in het huidige model uit NEN 6720, art. 4.1.4.5.

Voor alle metingen is een drietal berekeningen uitgevoerd, waarbij de wrijvingscoëfficiënt is gesteld op 0.040 en het getal van de Wobble-effect varieert tussen 0.030 en 0.060

Een visuele weergave van de resultaten is terug te vinden in figuur 8.6 en figuur 8.7. Hieruit blijkt dat indien wordt gerekend met een wrijvingscoëfficiënt van 0.040 en een Wobble-effect van 0.045 de metingen van zowel de rechte als gekromde voorspanstrengen veel beter worden benaderd (oranje lijn) ten opzichte van de huidige berekening (zwarte lijn).



Figuur 8.6 Vergelijk wrijvingsverlies huidige model, recht kabelverloop



Figuur 8.7 Vergelijk wrijvingsverlies huidige model, gekromd kabelverloop

De huidige rekenmethode uit NEN 6720, art. 4.1.4.5. kan blijven worden gebruikt met een correctie van de wrijvingscoëfficiënt naar 0.040 en een aangenomen Wobble-effect van 0.045. Het omschreven model in de vorige paragraaf is slechts een verfijning op het huidige model.



## 9. Conclusies en aanbevelingen

### 9.1. Conclusies

Naar aanleiding van het onderzoek zijn een aantal conclusies vast te stellen:

- Er is een analytisch en experimenteel onderzoek verricht om meer kennis te verkrijgen over het onderwerp wrijvingsverliezen bij voorspanning zonder aanhechting. Daarnaast is een verbetering gegeven voor de rekenmethode van de wrijvingsverliezen;
- Het belang van het onderzoek is vooral gericht op economisch en uitvoeringstechnisch gebied. Voor constructief gedrag en veiligheid is het onderzoek relatief minder belangrijk;
- Er is geen directe relatie te herleiden tussen de metingen verricht door de fabrikant van de voorspanstrengen en de bandbreedte voor de vaste waarden van het rekenmodel uit de norm;
- De huidige bandbreedte voor de wrijvingscoëfficiënt uit NEN 6720 is veel hoger dan de gemeten wrijvingscoëfficiënt tijdens laboratoriummetingen;
- Het huidige rekenmodel kan, indien aanpassingen aan de vaste waarden voor wrijvingscoëfficiënt en Wobble-effect worden gedaan, in zijn geheel gehandhaafd blijven;
- Het verbeterde model is slechts een verfijning van het bestaande rekenmodel;
- De resultaten van het verbeterde model en de metingen komen overeen bij het rechte kabelverloop;
- De resultaten van het verbeterde model en de metingen komen bij het gekromde kabelverloop niet overeen, maar het verbeterde model geeft wel een betere indicatie voor het optredende wrijvingsverlies;
- Door een betere inschatting te maken van de wrijvingsverliezen is vooraf ook beter te bepalen wat de uiteindelijke voorspankracht direct na spannen is. Daarnaast kan de verlenging van de voorspanstreng tijdens spannen nauwkeuriger worden bepaald.

## 9.2. Aanbevelingen

Naar aanleiding van het onderzoek worden de volgende aanbevelingen gedaan:

1. Om de juistheid van het verbeterde model te kunnen toetsen, moeten nog verschillende metingen worden verricht;
2. De metingen van de tankconstructies zijn in het onderzoek achterwege gelaten vanwege de grote afwijkingen bij de metingen. Bij de tankconstructies kan nog verder onderzoek worden verricht;
3. De huidige rekenmethode uit NEN 6720, art. 4.1.4.5. kan blijven worden gebruikt met een correctie van de wrijvingscoëfficiënt naar 0.040 en een correctie van het Wobble-effect naar 0.045;
4. De schuifkracht, gemeten door de fabrikant van de voorspanstreng, moet als basis gaan dienen voor het bepalen van de wrijvingscoëfficiënt die de constructeur gebruikt bij de berekening van de wrijvingsverliezen. Hiervoor moet een gestandaardiseerde meetopstelling worden gebruikt en een eenduidige beproevingsmethode worden vastgelegd.

Voorstel meetopstelling en de beproevingsmethode:

- De ideale meetopstelling is gebaseerd op het ontwerp van de uitgevoerde laboratoriummetingen. Hierbij wordt zowel de normaal- als trekkracht op de voorspanstreng continu gemeten;
- Alleen ter plaatse van het aanbrengen van de normaalkracht mag omhulling aanwezig zijn;
- De wrijvingscoëfficiënt kan worden bepaald door de trekkracht te delen door tweemaal de aangebrachte normaalkracht. Deze wrijvingscoëfficiënt kan vervolgens door de constructeurs worden meegenomen in de berekening van het wrijvingsverlies.

## Bronvermelding

### Literatuur

- [1] Cooley E.H.: Friction in post-tensioned Prestressing Systems, Research Report I, Cement and Concrete Association, okt. 1953. – Estimation of Friction in Prestressed Concrete, Cement and Concrete Association, London;
- [2] Fritz B.: Vorschläge zur genaueren Erfassung der reibungsbedingten Spannkraftverluste in geraden und gekrümmten Spannliedern. Session II Congress F.I.P. Berlin, 1958;
- [3] Dreux G.: Le contrôle d'exécution de la précontrainte sur le chantier de Pont de Tancarville, Session II Congress F.I.P. Berlin, 1958;
- [4] Knesch R.: Messung von Spannkraftverlusten an einer gekrümmten Brücke des Berliner Schnellstrassenringes. Session II Congress F.I.P. Berlin, 1958;
- [5] Commissie voor Uitvoering van Research: Rapport 30, Wrijvingsverliezen in spanelementen, 1959;
- [6] Green N.B.: Factors in design and construction of lift slab buildings, Journal of the American concrete institute, Proceedings, volume 59, nr 4, April 1962;
- [7] Bruggeling A.S.G.: Theorie en praktijk van het voorgespannen beton, Amsterdam 1963;
- [8] Beranek W.J. en B.G. ten Dam: Voorspannen zonder kernstralen, De Ingenieur 18 juli en 22 augustus 1969;
- [9] Kamerling J.W.: Voorgespannen beton met nagerekt staal zonder aanhechting, Cement 1971, nr.5;
- [10] Tukker T.: De evenwichtsbelastingmethode, Cement 1971, nr 7;
- [11] Spitse R.J.: Voorgespannen vloeren in de woningbouw, Cement 1972, nr 11;
- [12] Walter R. en Utescher G.: Vorausbestimmung der Spannkraftverluste infolge Dehrungsbehinderung, 1977;
- [13] Commissie voor Uitvoering van Research: Rapport 95, Voorspanning zonder aanhechting, 1979;
- [14] Ivanyi G.: Biegerißbildung bei Plattentragwerken mit Vorspannung ohne Verbund", Beton- und Stahlbetonbau 1981, nr.9;
- [15] Lin T.Y.: Design of prestressed concrete structures, 1981;
- [16] Kiwa: Attest K7201 – ACL Voorspanstelsysteem met of zonder aanhechting, 1994;
- [17] Walraven J.C.: Dictaat Voorgespannen Beton, TU Delft, 1997;
- [18] Melssen, A: Wrijvingsproeven VZA kabels systeem Spankern, Van der Vorm Engineering, aug 2000;
- [19] Newman, A.: Structural renovation of buildings - methods, details and design examples, 2000
- [20] Rombach G.: Spannbetonbau, april 2003;
- [21] Procedurehandboek Tensa, nov 2003;
- [22] Granzier S: Uitvoeringsplan Betonson t.b.v. R.W.Z.I. te Amsterdam, mei 2004;
- [23] Granzier S: Uitvoeringsplan Betonson t.b.v. R.W.Z.I. te Eindhoven, juni 2004;
- [24] Fib-bulletin 31: Post-tensioning in buildings; febr 2005;
- [25] Maes L.: Kathodische bescherming van voorspanstaal, Katholieke Hogeschool Brugge – Oostende, departement industriële wetenschappen en technologie, 2007;
- [26] Waheek S.: Introducing precast / prestressed concrete to engineering technology undergraduates: a case study, American Society for Engineering Education, Eastern Illinois University Charleston, 2007.
- [27] Presentatie NEDRI, Production Mono und Geo litze.
- [28] <http://www.atlasalbro.nl>
- [29] <http://nl.wikipedia.org/wiki/Wrijvingscoëfficiënt>

## Normen

- [a] NEN 6720, Voorschriften beton, sept 1995.
- [b] NEN 3868, Voorspanstaal, sept 2001;
- [c] American Concrete Institute: Building code requirements for structural concrete and commentary (ACI 318M-05), 2005;

## Figuren

- Figuur 2.2 <http://www.dywidag-systems.com/products/post-tensioning/bonded-bar-pt-system/standard-bars.html>
- Figuur 2.3 <http://www.spanstaal.nl/Bbr/Bbrv/Bbrv01.html>
- Figuur 2.4 <http://www.nedeximpo.nl/?Walsmateriaal:Draadproducten:Voorspanstrengen>
- Figuur 2.5 [http://www.betonson.nl/filespage/2167/vl\\_kanaalplaat\\_tas\\_hvp200\\_11.jpg](http://www.betonson.nl/filespage/2167/vl_kanaalplaat_tas_hvp200_11.jpg)
- Figuur 2.7 fib-bulletin 31, bladzijde 24 [24]
- Figuur 2.8 Production Mono und Geo litze [26]
- Figuur 4.1 fib-bulletin 31, bladzijde 4 [24]
- Figuur 5.2 <http://www.tribologie.nl/abc/friction.htm>
- Figuur 5.3 <http://www.tribologie.nl/abc/friction.htm>
- Figuur 5.4 <http://www.tribologie.nl/abc/friction.htm>
- Figuur 5.5 <http://www.tribologie.nl/abc/friction.htm>