

## Summary (in Dutch)

Staalkabels spelen een zeer grote rol binnen de techniek. Ze zijn zeer bruikbaar, vanwege hun lage buigstijfheid en grote breuksterkte. In heel veel transportwerktuigen komen we staalkabels tegen. Denk aan hijskranen, trommels, lieren en liften. Maar staalkabels worden ook in min of meer statische toepassingen gebruikt zoals tuibruggen. De geschiedenis van staalkabels gaat terug tot 1834. De mijnbouwer Julius Albert heeft toen de ketting van een kolenmijn vervangen door een soort staal kabel. Het schijnt dat de historie in werkelijkheid nog bijna 20 jaar terug gaat, omdat er toen al staalkabels gebruikt werden in de bruggen bouw. Gedurende de tijd van bijna 200 jaar is er veel onderzoek gedaan naar staalkabels. Het grote doel van deze onderzoeken was driedelig: de buigstijfheid nog verder verlagen, de treksterkte verhogen en de slijtage verminderen. Het resultaat mag er zijn, want vandaag de dag worden er staalkabels gebruikt met een ruim 4 keer hogere sterkte dan 200 jaar geleden. De toegenomen sterkte heeft veel te maken met de toegenomen inzichten met betrekking tot materiaalkunde. De slijtage en buigstijfheid heeft men terug kunnen dringen door de staalkabels op een andere manier te slaan dan vroeger, dit resulteerde uiteindelijk in een groter levensduur. Helaas blijft slijtage een belangrijk probleem. Müller (1977) ontdekte dat met smering een grote winst met betrekking tot levensduur kan gehaald worden. Gesmeerde staalkabels hebben een veel langere levensduur. Waterhouse en Taylor (1971) hebben een drietal eisen opgesteld waaraan het smeermiddel moet voldoen.

Naar de mechanica van staalkabels is veel onderzoek gedaan. Benndorf (1904) vond dat de elasticiteit modulus van staalkabels niet constant was, maar varieerde met de geometrische eigenschappen van de staalkabel, hij heeft een formule opgesteld waarmee de elasticiteit module voor een type staalkabel berekend kan worden. Ook de Poisson constante blijkt niet constant te zijn, deze kan alleen door middel van experimenten bepaald worden. Tijdens levensduur experimenten liep men tegen een ander probleem aan, kabels braken op de eindverbinding. Dit maakt het hele experiment waardeloos. De eindverbindingen moeten simpelweg sterker zijn dan de kabel zelf, pas dan kan er geëxperimenteerd worden met staalkabels. Drooger (1962) behandelt verschillende eindverbindingen in zijn boek. De hars socket wordt gezien als de beste eindverbinding.

Om spanningen te kunnen bepalen en berekenen moet eerst een mathematisch model opgesteld worden van de staal kabel, dit model beschrijft met drie coördinaten elk punt van de draad in de ruimte. Het simpelste model is een enkele draad in een rechte streng. Het model wordt heel wat ingewikkelder als een draad wordt beschouwd in een streng die om een kern streng is geslagen. Met behulp van deze mathematische vergelijkingen kan de buig- en torsiespanning uitgerekend worden. Schiffner was de eerste die in het opstellen van de parametrische vergelijkingen voor gebogen staalkabels onderscheid maakte tussen staalkabels met veel en weinig laterale ruimte. Wiek (1986) is de enige voor zover bekend die onderzoek heeft gedaan naar het eerste en tweede raakprobleem. Het raakprobleem houdt in dat draden met de juiste diameter zodanig worden gevlochten tot staalkabels dat de draden in dezelfde laag elkaar raken, maar ook dat draden van een bovenliggende laag goed aansluiten op de onderliggende laag.

Naast torsie- en buigspanningen treden er uiteraard trekspanningen op in de staalkabel. Deze kunnen redelijk eenvoudig bepaald worden wanneer de door Berg (1907) ontdekte schuifspanning wordt verwaarloosd. Benndorf (1904) en Feyrer (2007) hebben vergelijkingen afgeleid waarmee de trekspanningen in kabels kunnen uit worden gerekend.

Zoals genoemd, kunnen de buigspanningen uitgerekend worden met behulp van de mathematische vergelijkingen. De berekening van deze spanning heeft een rijke historie. Reuleaux dacht dat deze spanning constant was, maar uiteindelijk hebben Leider (1977) en Schiffner (1986) de juiste relatie gevonden. Naast trek-, buig- en torsiespanningen ontstaan volgens Andorfer (1983) en Schmidt (1965) secundaire trekspanningen die worden veroorzaakt door de wrijving tussen de draden. Wanneer in een staalkabel draden elkaar kruisen en deze draden radiaal belast worden, zullen secundaire buigspanningen ontstaan. Wanneer een draad over een schijf gebogen is, zullen er ovalisatie spanningen optreden, ook zullen er druk spanningen ontstaan tussen de staalkabel en de schijf. Deze spanningen kunnen zeer hoog zijn en kunnen plaatselijk vloeï veroorzaken. Wiek en Häberle hebben beiden onderzoek gedaan naar de verdeling van de kabel druk in de groef van de schijf. Wiek was de eerste die onderzoek hiernaar deed, de resultaten van Häberle's experimenteel onderzoek hadden overeenkomst met Wiek's theoretisch resultaat. Niet alleen tussen kabel en schijf ontstaan hoge contactkrachten, ook tussen de draden zelf. Starkey en Cress (1959) onderzochten deze contactkrachten. Ze concludeerden dat het falen van kabels vaak veroorzaakt wordt door de hoge punt contact spanningen.

Naast trek en buiging wordt een staalkabel ook op torsie belast. In sommige gevallen (niet geleide lasten) wil je voorkomen dat de kabel ten gevolge van de belasting uitdraait. Een draaiarme of draaivrije staal kabel is dan de oplossing, maar deze kabels hebben hoge interne punt contacten. In praktijk wordt daarom toch niet voor een draaiarme of draaivrije staalkabel gekozen. Vooral in offshore toepassingen levert dit problemen op, staalkabels worden soms voortdurend op wisselende trek belast. Deze trekkracht zorgt voor een torsie in de kabel. Voortdurend veranderde torsie belasting in een kabel heeft uiteindelijk wrijvingsvermoeïing tot gevolg hebben.

Onderzoek naar staal kabels is voornamelijk gericht op: hoe kan de levensduur geoptimaliseerd worden? Er zijn zeer veel experimenten gedaan om de levensduur te kunnen bepalen. Er kan een onderscheid gemaakt worden tussen kabels die alleen op fluctuerende trek worden belast en kabels die op buiging met eventueel een trek belasting worden belast. Bij staalkabels die onderhevig zijn aan buiging zijn er heel veel parameters die de vermoeïing 's levensduur bepalen van de staalkabel. Enkele parameters zijn: verhouding tussen schijf en kabel diameter, diameter van de kabel, groef radius, groef materiaal, het op en afwinden van een trommel en de smering in de kabel. Müller(1977) is een van de onderzoekers die heel veel onderzoek gedaan heeft naar het effect van verschillende parameters op de levensduur van kabels die worden gebogen over schijven. Wiek heeft benadrukt dat kabel breuk in veel gevallen helemaal niet de oorzaak is van vermoeïing, maar dat het een combinatie is van vermoeïing, corrosie, slijtage en vernieling. Doordat deze factoren bepalend zijn voor de levensduur, is het heel lastig vooraf te bepalen wanneer een kabel zal moeten worden vervangen. Verkeerde opslag van een staalkabel kan de levensduur van een kabel aanzienlijk verminderen. Het is

daarom een vereiste dat de kabel volgens de geldende standaarden wordt opgeslagen, geïnstalleerd en wordt onderhouden. Vervolgens is de gebruiker verantwoordelijk voor welk afdank criteria hij gebruikt. De NEN normen geven richtlijnen hierin. Het gebruik van verschillende inspectie methodes kan helpen bij het beoordelen van staalkabels.

Tijdens het ontwerpen van een kabel aandrijving is het van belang dat de buig lengte, de belasting en het aantal buigingen worden bepaald. De Nederlandse of Europese normen moeten voor het ontwerp gebruikt worden. Vergelijking tussen de normen en de behandelde theorie laat duidelijk zien dat de resultaten van de experimenten zijn meegenomen in de ontwerpnormen.

De laatste jaren is een toegenomen belangstelling voor het gebruik van eindige elementen modellering waar te nemen met betrekking tot staalkabels. Het voordeel van een eindige-elementen model is dat deze ook de niet lineaire effecten mee neemt in de berekening. Zoals op zich te verwachten is, komen de bestaande modellen en resultaten van experimenten overeen met de eindige elementen modelering. Er is een heel groot nadeel aan het gebruik van eindige elementen modelering, voor een beetje betrouwbaar model heb je heel veel elementen nodig. Met als gevolg een heel lange rekentijd.