

Normaalkracht, wrijving en slip

Normaalkracht, wrijvingskracht en wrijvingscoëfficiënt

Remmen, accelereren en sturen kunnen alleen maar plaatsvinden door krachten. Krachten zullen van het voertuig op het wegdek moeten worden overgebracht. Deze krachten zullen voortdurend in grootte en richting variëren. Het spinnen van wielen tijdens het wegtrekken, het remmen met blokkerende wielen en het uit de bocht vliegen zijn voorbeelden waarbij de krachten vanaf de motor en het remsysteem niet in overeenstemming zijn met de krachten die op het wegdek overgebracht moeten worden. Om de kracht van de banden over te brengen op het wegdek hebben we een wrijvingscoëfficiënt nodig. Vanuit de natuurkunde is het verband bekend tussen de wrijvingskracht (F_w), de normaalkracht (F_n) en de wrijvingscoëfficiënt (μ). Wanneer we een geblokkeerd wiel voorstellen als een stukje band (rubber) waar we een druk op uitoefenen (de wielbelasting F_n) en dat we vervolgens gaan trekken over het wegdek met een kracht F_t dan ontstaat een situatie als in fig. 1

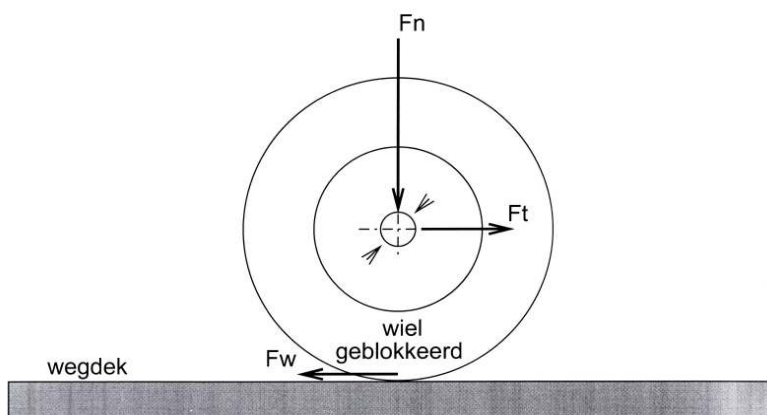


Fig.1 De normaalkracht (F_n) en de kracht (F_t) die we uit moeten oefenen om de wrijvingskracht (F_w) van het geblokkeerde wiel te overwinnen bepaalt de wrijvingscoëfficiënt. In formule: $F_w / F_n = \mu$

Nu blijkt dat wanneer we de normaalkracht (wielbelasting) vergroten, de trek- of wrijvingskracht evenredig toeneemt. De relatie tussen de wrijvingskracht en de normaalkracht is dus een (min of meer) vaste grootte die afhangt van de materialen. In dit geval van het soort rubber en het wegdek materiaal. Het is duidelijk dat de grote variabele, de toestand van het wegdek is. Regen, modder, sneeuw en ijs beïnvloeden de wrijvingscoëfficiënt zodanig dat er grote verschillen kunnen ontstaan. In de praktijk zal een droog, stroef wegdek ten minste een wrijvingscoëfficiënt van 0,9 bezitten en een beïzeld wegdek een wrijvingscoëfficiënt van 0,1 (fig. 2).

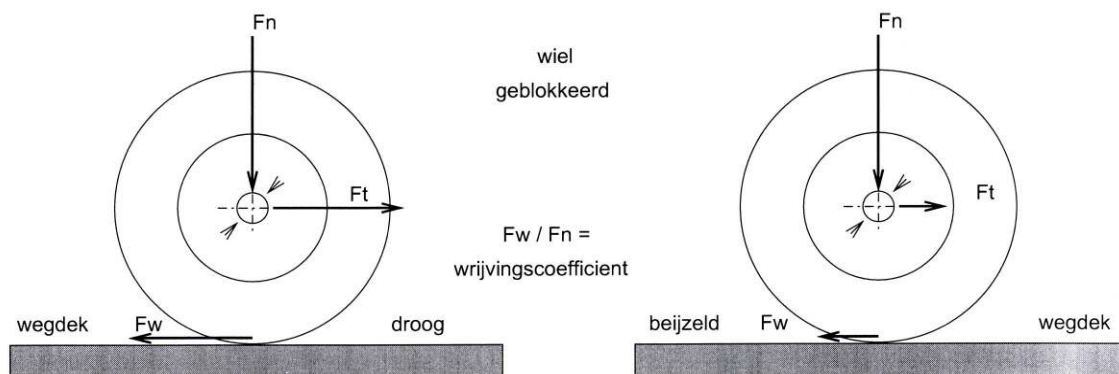


Fig. 2 Verschillende wegdeksituaties geven verschillende wrijvingscoëfficiënten (Let op: wiel is geblokkeerd).

Nu hebben we in de auto meestal niet te maken met schuivende maar met rollende banden. De rolweerstandscoefficiënt van een rollend, niet afgeremd wiel (μ_{rol}) is uiteraard aanmerkelijk lager dan dat van een blokkerend (schuivend) wiel ($\mu_{blokkeer}$). Wanneer we deze situatie bekijken voor een standaard radiaalband voor een gemiddelde personenwagen dan blijkt de rolweerstandscoefficiënt op 0,0125 te liggen (waarden variëren tussen de 0,010 en 0,014 bij verschillende fabrikanten). In fig. 3 zijn beide situaties weergegeven.

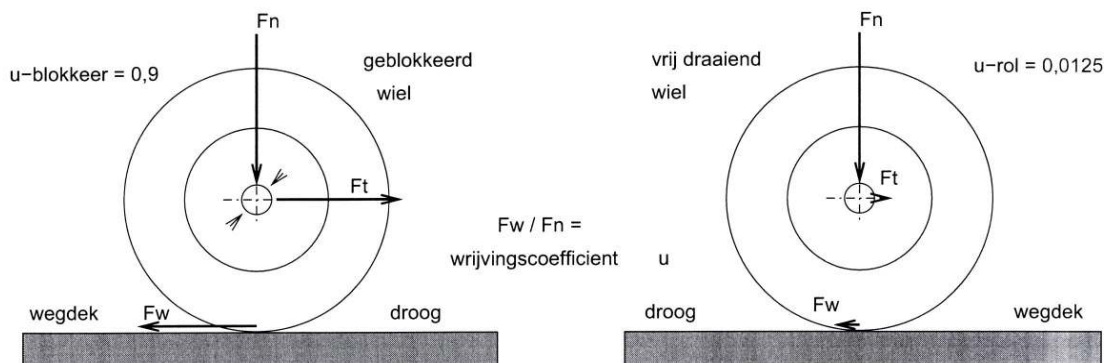


Fig. 3 Een trekkracht van $F_n \times 0,0125$ N is nodig voor een rollend wiel om vooruit te komen terwijl een schuivend (blokkerend) wiel $F_n \times 0,9$ N nodig heeft, dus $0,9 / 0,0125 = 72x$ meer.

Maar wat gebeurt er wanneer we een eenmaal rollend wiel gaan afremmen of wanneer we een rollend wiel gaan versnellen? In beide gevallen zullen de krachten tussen de band en het wegdek moeten veranderen. De grootte van de kracht zal afhankelijk zijn van de mate waarin we met het voertuig willen accelereren of remmen. Aangezien de wielbelasting (nog) niet zal variëren zal dus de wrijvingscoëfficiënt moeten veranderen. En hier komt dan onze belangrijke conclusie: De wrijvingscoëfficiënt (μ) van een rollend (doch afgeremd of accelererend) wiel op een droog en stroef wegdek kan variëren tussen de 0,0125 en 0,9. Deze variatie in de wrijvingscoëfficiënt wordt verkregen vanuit de wielslip. Wanneer het voertuig met een vaste snelheid over de weg rijdt dan zal de (omtrek)snelheid van het wiel gelijk zijn aan de voertuigsnelheid. Wanneer we gaan remmen dan zal het wiel worden tegengehouden en zal de wielsnelheid kleiner worden dan de voertuigsnelheid. Hierdoor zal de wrijvingscoëfficiënt (μ) tussen band en wegdek moeten oplopen om voldoende remkracht te krijgen. Bij een accelererend voertuig geldt hetzelfde, maar dan omgekeerd. Ook om te accelereren hebben we een kracht nodig tussen band en wegdek. Het motorkoppel geeft een wielversnelling zodat de wielsnelheid groter wordt dan de voertuigsnelheid. Hierdoor loopt de wrijvingscoëfficiënt op waardoor ook de trekkracht groter kan worden. Wielslip wordt als het volgt gedefiniëerd:

$$\text{slip } (\lambda) = \frac{\text{voertuigsnelheid (m/s)} - \text{wielsnelheid (m/s)}}{\text{voertuigsnelheid (m/s)}}$$

Wielslip kan dus zowel positief (remmen) als negatief zijn (accelereren). Bovenstaande formule kan ook worden geschreven als:

$$\text{wielsnelheid} = \text{voertuigsnelheid} - (\text{voertuigsnelheid} \times \lambda)$$

Het verband tussen de wielslip en de rolwrijvingscoëfficiënt (μ_{rol}) laat zich in eerste instantie grafisch door een vrijwel rechte lijn voorstellen. Dit noemt men het stabiele gebied. In het stabiele gebied is de relatie tussen wielslip en de wrijvingscoëfficiënt rechtevenredig. Dit gaat op tot een wielslip van ongeveer 20%. Na de 20% slip ontstaat het zgn. instabiele gebied en we zien dat de wrijvingscoëfficiënt vermindert bij een verhoogde wielslip. Dit wordt veroorzaakt door de warmteontwikkeling waardoor de band-wegdekeigenschappen veranderen. Fig. 4 toont ons deze theoretische μ -grafiek. In werkelijkheid is het verloop tussen de wrijvingscoëfficiënt en de wielslip

wat minder strak en wanneer door de weersinvloeden de maximale wrijvingscoëfficiënt minder wordt ontstaat er een grafiek met dezelfde vorm waarin ook weer een stabiel en instabiel valt te onderscheiden. De waarden liggen echter veel lager. Fig. 5 geeft enige voorbeelden.

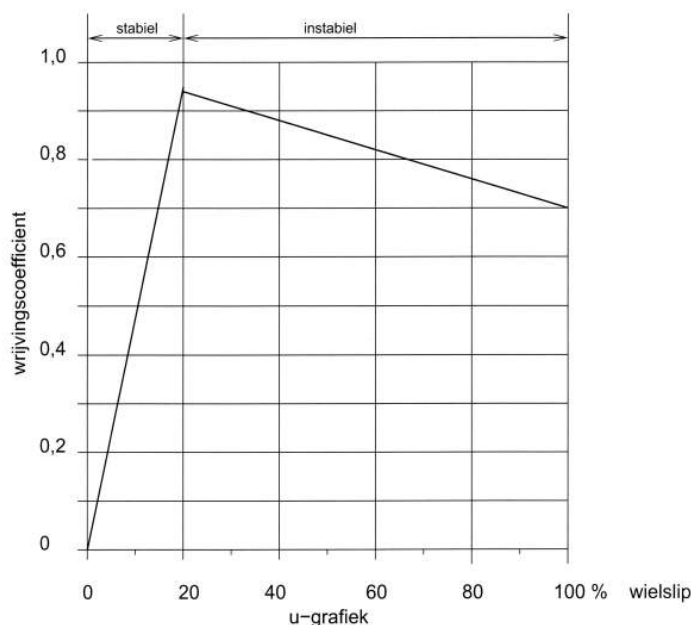


Fig. 4 Wielslip en wrijvingscoëfficiënt nemen evenredig toe in het stabiele (rem)gebied. Bij ongeveer 20% zien we dat bij toenemende wielslip de wrijvingswrijvingscoëfficiënt daalt.

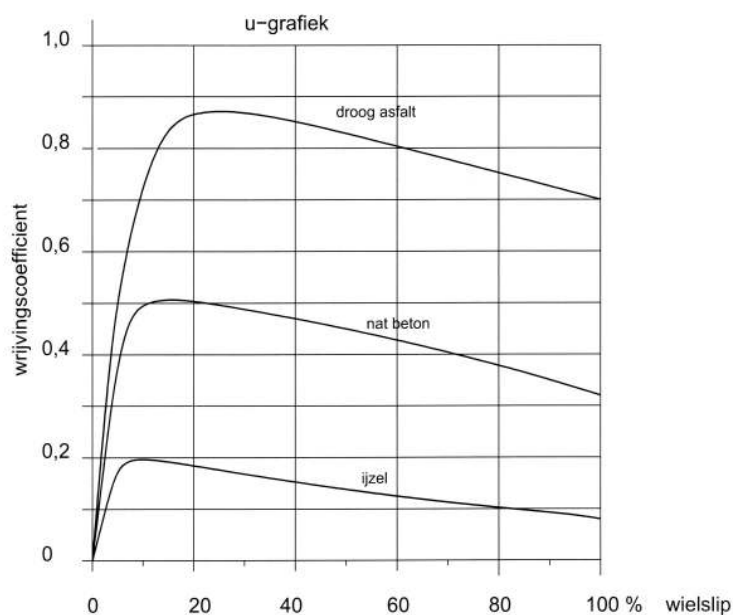


Fig. 5 Een drietal band-wegdek situaties worden in de μ -grafiek weergegeven.

ABS-systemen dienen er voor te zorgen dat onder alle omstandigheden in het stabiele gebied wordt geremd. Hoewel volgens fig. 5 de situatie van het wegdek de grootste variabele is spelen ook de afmetingen van de band, het type band en de profieldiepte een rol. Het knikpunt van de grafiek waarbij het stabiele gebied overgaat in het a-stabiele gebied ligt bij onze theoretische grafiek van fig. 4 bij de 20 %. Bij andere banden en wegdeksituaties kan dit knikpunt verschuiven. De maximale wrijvingscoëfficiënt ligt bij moderne banden tussen de 8 en 25 % wielslip.

Langs- en dwarskrachten

Behalve remmen en accelereren zal er van richting moeten worden veranderd. Ook voor een richtings-verandering is een kracht nodig. De benodigde kracht om een auto door een bocht te sturen, de zgn. centripetaalkracht wordt ook verkregen vanuit de wrijvingskracht tussen band en wegdek. Deze wrijvingskracht wordt ook wel de spookkracht genoemd (fig. 6).

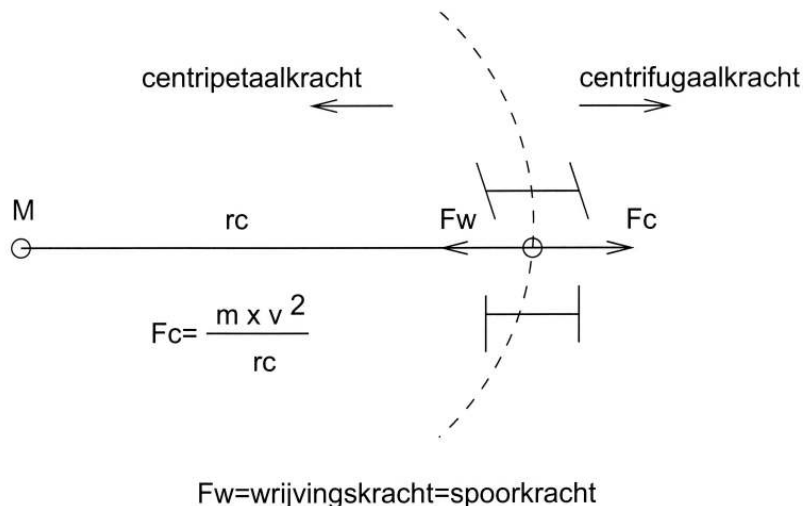


Fig. 6 Uit de wrijvingskracht tussen band en wegdek ontstaat de spookkracht.

Men maakt derhalve onderscheid tussen μ_l , de wrijvingscoëfficiënt in langsrichting (voor remmen en accelereren) en μ_d , de wrijvingscoëfficiënt in dwarsrichting voor de bochten. Voor het begrip mag men stellen, dat wanneer er een beroep wordt gedaan op de dwarswrijvingscoëfficiënt μ_d , omdat het voertuig een bocht gaat beschrijven, er minder overblijft voor μ_l en er derhalve minder sterk kan worden geremd. Fig. 7, de zgn. cirkel van Kamm geeft de relatie weer tussen μ_l en μ_d . Veelal wordt ook de volgende formule $\mu_r = \sqrt{\mu_l^2 + \mu_d^2}$ gebruikt, waarin μ_r de resulterende wrijvingscoëfficiënt voorstelt.

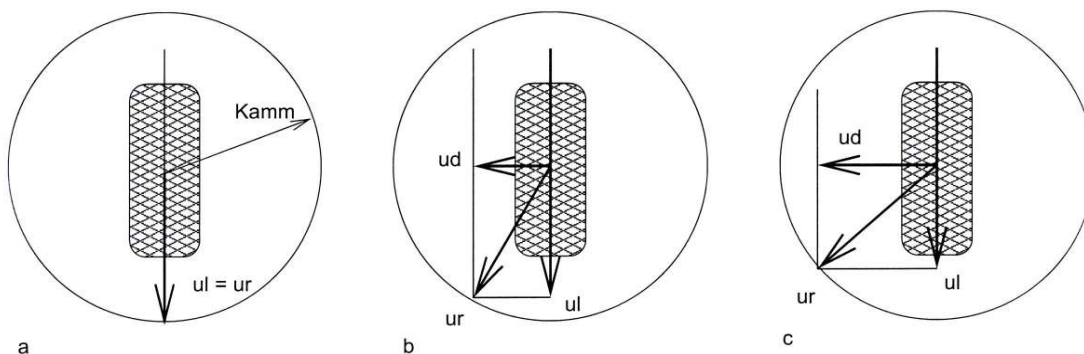


Fig. 7 De relatie tussen de langs- en de dwarswrijvingscoëfficiënt voorgesteld door de cirkel van Kamm (Duits ingenieur). We zien dat naarmate de dwarskracht groter wordt er minder over blijft voor de langskracht.

Wanneer er dus sprake is van **remmen** en **sturen** dan zal dan zal er om de benodigde remkrachten en stuurkrachten op te wekken een beroep moeten worden gedaan op de wrijvingscoëfficiënt in lengterichting en in dwarsrichting. Deze relatie wordt duidelijk(er) in de grafiek van fig. 8. Hierin is te zien dat de beschikbare wrijvingscoëfficiënt in dwarsrichting drastisch vermindert boven de 20% wielslip.

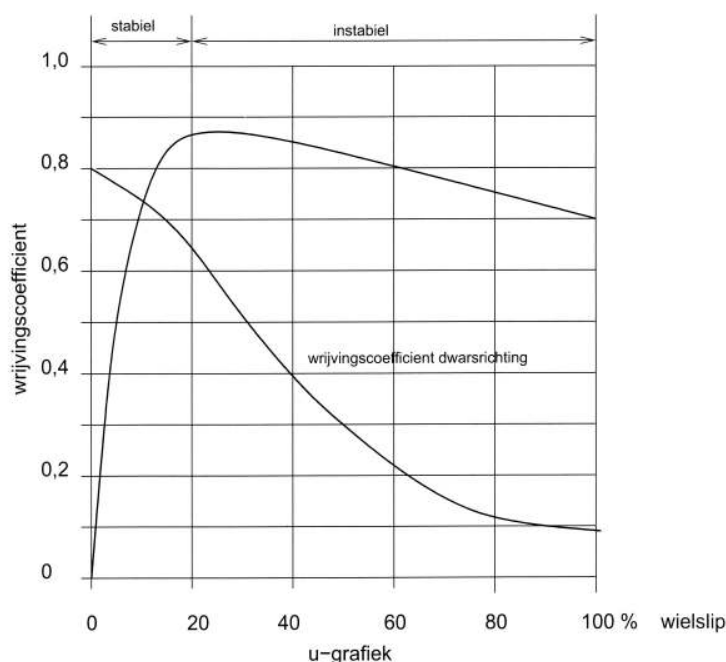


Fig. 8 In het stabiele gebied is de relatie tussen rem- en stuurkrachten optimaal .

Het zal duidelijk zijn dat bij een klassiek ontworpen remsysteem de maximale remkracht gepaard aan een maximale bestuurbaarheid van de auto op gespannen voet met elkaar (kunnen) staan. Men is in grote mate afhankelijk van het inschattingsvermogen en de ervaring van de bestuurder.

Conclusie:

Wanneer we gedoseerd remmen en accelereren zullen we de wrijvingscoëfficiënten aanspreken in het stabiele μ -gebied tot aan het knikpunt. Na het knikpunt ontstaat het zgn instabiele gebied, de wrijvingscoëfficiënt neemt af en de slip toe. Behalve dat er in het instabiele gebied minder hard geremd en geaccelereerd kan worden neemt ten gevolge van de toenemende slip ook de richtingsstabiliteit van het voertuig af (slipneiging van het voertuig neemt toe) Er wordt ook wel gesteld dat de belangrijkste eigenschap van een ABS-systeem is, dat de bestuurbaarheid van het voertuig tijdens het remmen gehandhaaft blijft. Met andere woorden men kan tijdens het remmen blijven sturen. In werkelijkheid is de situatie nog iets ingewikkelder. De cirkel van Kamm is namelijk geen echte cirkel maar een ovaal, die in de lengterichting meestal groter is dan in de dwarsrichting. Door de constructie van de band is de maximale wrijvingscoëfficiënt van de band in lengterichting groter dan in dwarsrichting. Fig. 9 laat de gecorrigeerde 'cirkel' zien.

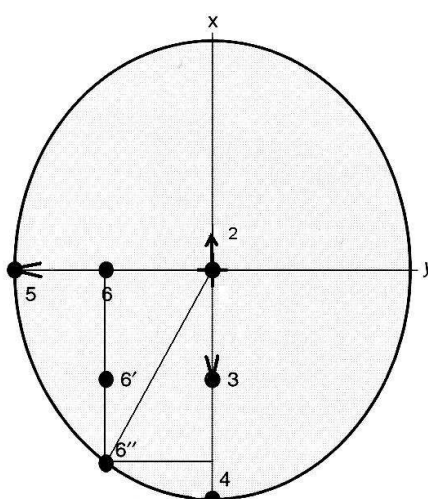


Fig. 9 Wrijvingsellips voor verschillende rijomstandigheden van de auto.
 2 rechtoetrijden; 3 matig remmen rechtoet; 4 maximaal remmen rechtoet; maximale bocht zonder remmen; 6 gematigde bocht zonder remmen; 6' gematigde bocht met matig remmen, 6'' maximale bocht bij bepaalde maximale remvertraging.

Vragen en opgaven

- 1) Men maakt onderscheid tussen de blokkeerwrijvingscoëfficiënt, rolweerstandcoëfficiënt en de wrijvingscoëfficiënt bij een remmend, rollend wiel. Leg dit verschil uit.
- 2) Hoeveel Newton trekkracht is nodig om een auto met een massa van 1000 kg in beweging te houden? De wielbelasting is bij alle wielen gelijk. (Rolweerstandcoëfficiënt = 0,013, blokkeerwrijvingscoëfficiënt = 0,8)
 - a) Wanneer vier wielen geblokkeerd staan.
 - b) Wanneer twee wielen geblokkeerd staan.
 - c) Wanneer alle wielen vrij kunnen draaien.
- 3) De wrijvingscoëfficiënt tussen band en wegdek varieert tussen een minimum en een maximum waarde. Wat is de maximale waarde volgens fig.5 wanneer er sprake is van ijzel?
- 4) Hoe km/h bedraagt de voertuigsnelheid wanneer er geremd wordt met een wielslip van 10 %. Die wielsnelheid bedraagt op dat moment 25 m/s.
- 5) Onder welke omstandigheden is:
 - a) de voertuigsnelheid gelijk aan de wielsnelheid?
 - b) de voertuigsnelheid hoger dan de wielsnelheid?
 - c) de voertuigsnelheid kleiner dan de wielsnelheid?
- 6) Geef in fig. 5 aan waar zich het stabiele en instabiele gebied bevindt.
- 7) Heeft de profieldiepte naar uw mening invloed op het μ -verloop? Verklaar het antwoord.
- 8) Wat verstaan men onder een centripetaalkracht?
- 9) Op welke wijze wordt de dwarswrijvingscoëfficiënt opgewekt?

10) Hoe groot dient de dwarswrijvingskracht (centripetaalkracht) te zijn wanneer een auto met een snelheid van 90 km/h een bocht neemt met een straal van 100 m. Massa voertuig = 1000 kg.

Te gebruik formule : $F_c = (M \times v^2) / r_c$

hierin is:

F_c = de centrifugaalkracht in Newton;

M = massa in kg;

v = snelheid in m/s;

r_c = straal van de bocht in meters.

11) Een te veel aan wielslip geeft een vermindering van de richtingsstabiliteit van het wiel. Wat wordt daarmee bedoeld ?

12) Wat is het grootste probleem wanneer er geremd wordt met een wielslip van meer dan 50%?

13) Welke relatie geeft de cirkel van Kamm weer?

14) De werkelijke cirkel van Kamm is geen cirkel maar een ellips. Wat betekent dit voor de maximale wrijvingscoëfficiënt in lengterichting t.o.v. de wrijvingscoëfficiënt in dwarsrichting?

15) Hoe wordt het bedoelde verschil in de vorige vraag veroorzaakt?