4.17 Overbrenging

In een groot aantal gevallen komt het vereiste toerental en het daarbij behorende gevraagde koppel van het (opvoer)werktuig niet overeen met dat van het aandrijfwerktuig. Ook moet het aangedreven werktuig gekoppeld worden aan het aandrijfwerktuig en wel op een zodanige wijze dat er enige bewegingsvrijheid is om uitlijnfouten, slijtage van lagers en ongelijke uitzetting van machinedelen op te kunnen vangen. In die situaties moet gebruik gemaakt worden van wat we in de techniek een directe- of een indirecte- overbrenging noemen. Onder de directe overbrengingen, voorzover toegepast bij stoomgemalen, worden de vaste en flexibele koppelingen geschaard. Bij de vaste overbrenging vindt alleen overdracht van het koppel plaats. Onder de indirecte overbrenging kunnen we de kamraderen, riem- snaar- en tandwieloverbrengingen scharen. Bij dit soort overbrengingen wordt niet alleen het koppel overgebracht maar worden ook vaak de draairichting en het toerental en daarmee het koppel veranderd. Ook biedt de indirecte aandrijving de mogelijkheid om de gedreven as onder een andere hoek te plaatsen dan die van het aandrijfwerktuig.
Indirecte overbrengingen die we bij stoomgemalen tegenkomen zijn vaak kopieën uit de overbekende wind-watermolens die vaak uit houten kamwielen bestonden.

Het vermogen P dat door een as moet worden overgebracht is:

$$P = \frac{m.\omega}{75}\,[pk]$$

Of anders geschreven:

$$P = \frac{m.\frac{2\pi\,n}{60}}{75} = \frac{m.\pi.n}{30.75}\;[pk]$$

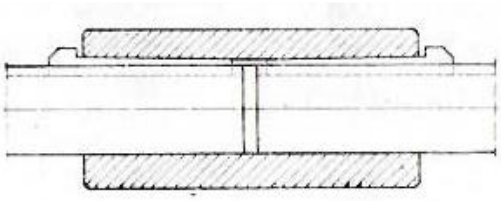
Hierin is m het koppel in kg.m en ω de hoeksnelheid van de rotatie-as in radialen per seconde. Uit het bovenstaande kan worden afgeleid dat bij het veranderen van het toerental n het koppel omgekeerd evenredig verandert met het toerental. Dit zie je terug in de afmetingen van de assen en de lagers van de overbrenging; de relatief snel draaiende krukas van de stoommachine is dunner dan de zeer langzaam draaiende aandrijfas van het scheprad.

4.17.1 Directe overbrenging

Koppelingen dienen tot verbinding van assen onderling of met machines, werktuigen, of machine-onderdelen, die ononderbroken of zo nu en dan met de as moeten meedraaien.
Als een vaste verbinding tot stand gebracht moet worden, gebruikt men een vaste koppeling. Moet de koppeling een beweging van de ene as ten opzichte van de andere as mogelijk maken, bijvoorbeeld wegens lengte verandering door uitzetting dan wel krimp of in radiale zin als gevolg van uitlijnfouten dan brengt met een beweegbare of flexibele koppeling aan. Een verbinding die stoten in grotere of geringere mate dempt noemt men een elastische koppeling. Een elastische koppeling is tevens beweegbaar. Kan de verbinding alleen bij stilstand ingeschakeld worden dan wel gedurende de beweging worden verbroken dan wordt een klauw- of uitklink-koppeling toegepast. Wanneer de verbinding op elk willekeurig moment in- of uitgeschakeld moet kunnen worden dan gebruikt men een inklink- wrijvings- of frictiekoppeling.

Mofkoppelbus

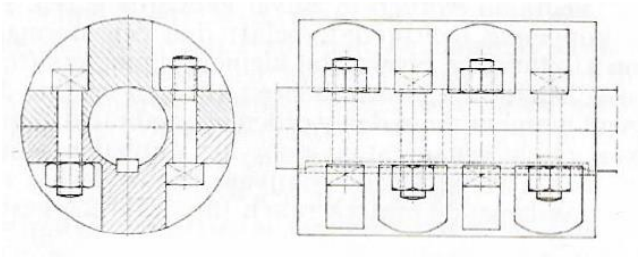
De mofkoppelbus zoals hier afgebeeld munt uit door haar eenvoud en wordt toegepast daar waar het ontkoppelen niet vaak aan de orde is. Zij heeft het nadeel dat bij het opspieën de assen krom getrokken kunnen worden en eventuele kogellagers beschadigd kunnen raken. Verder moeten de asdelen precies in elkaars verlengde liggen en met gelijke maattoleranties nauwkeurig zijn afgewerkt. Bij het aanbrengen en losnemen moeten deze minimaal een halve koppel bus lengte over de as kunnen worden verschoven. Het materiaal van de bus is gegoten ijzer of staal. Als gevolg van de twee spieën valt het zwaartepunt niet in het hart van de as, dit is de reden dat een dergelijke koppeling wegens de daardoor veroorzaakte onbalans niet bij assen met een hoog toerental mogen worden toegepast.



Mofkoppelbus

Klemkoppelbus met bouten

Een veel toegepaste koppeling bij een stoominstallatie is die met een klemkoppelbus met bouten. Deze bus is gemakkelijk demonteerbaar waardoor reparaties aan afzonderlijke delen van de machine eenvoudig kunnen worden uitgevoerd. Om de twee helften goed tegen de as te kunnen klemmen wordt de diameter van de boring iets kleiner genomen dan die van de as zodat de helften ook zijdelings goed klemmen en de wrijvingskracht nodig voor het overbrengen van het koppel, tussen koppeling en as toeneemt. Soms, meestal als er schokkende belastingen worden verwacht, zijn hiertoe de twee asdelen en de bus voorzien van een spie.

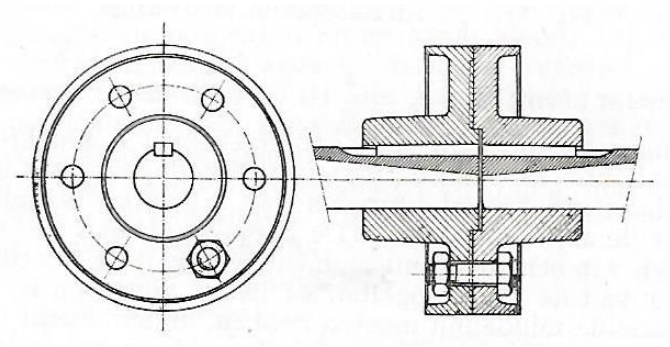


Klemkoppelbus met bouten

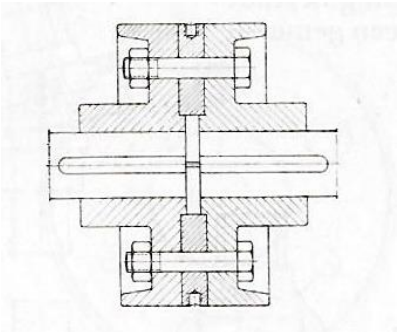
De koppeling is dan niet geschikt voor het overbrengen van een van richting veranderend moment. Een bezwaar van de klemkoppelbussen is dat de assen nauwkeurig dezelfde diameter moeten hebben, anders klemt de bus om het dikste aseind terwijl die bij het dunste deel los blijft zitten. Deze bussen worden overwegend van gietijzer gemaakt.

Flenskoppelbus

Een flenskoppelbus wordt overwegend toegepast bij zwaar belaste assen. De flenskoppelbus wordt zowel van gietijzer als van staal gemaakt. De koppeling-helften worden op de aseinden gespied, geperst of gekrompen. Het spreekt voor zich dat deze methode om assen te koppelen alleen kan worden toegepast bij lagers die zijn te delen.



Flenskoppelbus

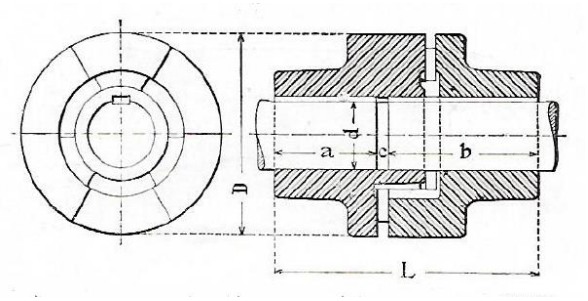


Flenskoppelbus met centreerschijf

Een verhoging op de ene koppelschijf, de zogenoemde prent, en een uitsparing in de andere zorgt voor de centrering van de beide koppeling-helften en van de daarmee verbonden aseinden. Soms wordt aan beide koppelinghelften een prent gedraaid en past men een aparte centreerschijf toe. De koppeling-helften worden met pasbouten, waarvoor geruimde gaten in de flenzen zijn aangebracht, aan elkaar gezet.

Expansiekoppeling

Om de lengteverandering van assen ten gevolge van temperatuur verandering op te nemen past men de zogenoemde expansie koppeling toe. Door gegoten ijzeren schijven met klauwen wordt de rotatiebeweging van de as overgebracht, waarbij voldoende speling in axiale richting mogelijk is. De assen worden onderling gecentreerd doordat het ene aseind glijdend in de andere koppeling-helft past of door een afzonderlijke stalen centreerring waarvoor een uitsparing in de koppeling is aangebracht. De koppeling-helften worden met spieën op de as bevestigd.

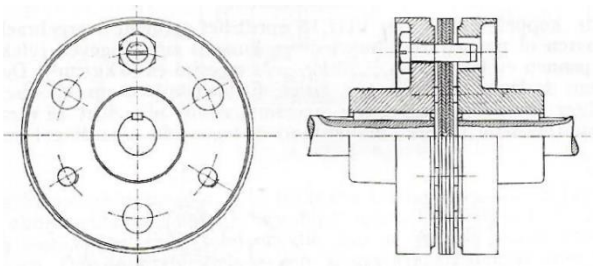


Expansie koppeling

Elastische koppeling

Elastische koppelingen gebruikt men als de stoten in de belasting, die in het drijfwerk kunnen voorkomen, zich niet mogen voortplanten. De koppeling dempt de stoot en de eventuele (torsie)trilling gedeeltelijk. In het bijzonder worden dergelijke koppelingen gebruikt om assen met elektromotoren of dynamo's te verbinden. Bij stoominstallaties op gemalen tref je ze bijvoorbeeld aan bij elektrisch gedreven vacuümpompen, ketel- voedingswaterpompen, suppletiewaterpompen en dergelijke. Met elastische koppelingen kunnen tevens geringe uitlijnfouten worden opgevangen.

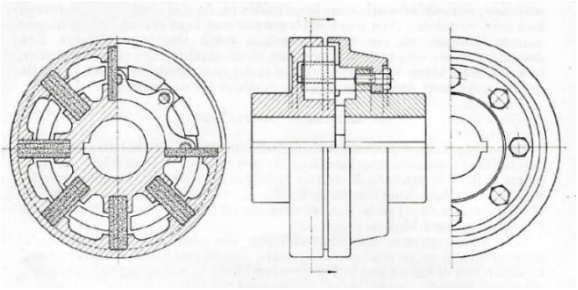
Hier onder wordt een leren schijven koppeling getoond voor een relatief klein over te brengen moment. De koppeling heeft twee naven met flenzen. Door elke flens zijn drie of meer pennen geschroefd. Beurtelings grijpen de pennen van de ene en de andere koppeling-helft in de gaten van de leren schijven, die tussen de flenzen zijn aangebracht. Door de elasticiteit van het leer wordt de energie van het stoten gedeeltelijk opgenomen. De koppeling is ook flexibel waardoor de assen een kleine hoek met elkaar mogen maken en de hartlijnen hiervan niet precies tegenover elkaar hoeven te liggen. Hierbij dient opgemerkt te worden dat uitlijnfouten tot extra slijtage van de leren schijven, trilling en geluidsontwikkeling leiden en daarom tot een minimum beperkt moeten blijven.



Tegenwoordig, anders dan voorheen, staan moderne middelen ons ter beschikking zoals meetklokjes en laser om tot op honderdsten van millimeters nauwkeurig uit te lijnen. Voorheen gebeurde dat met een stalen rij, voelermaten en veel vakmanschap en was desondanks enige flexibiliteit in de overbrenging gewenst.

Lerenschijvenkoppeling

Bij de hieronder afgebeelde Eupex-koppeling drukken de nokken van de koppeling-helften tegen uit elastisch materiaal samengestelde pakketten, welke hierdoor worden ingedrukt en gebogen. De pakketten bestaan uit rubber of leer. De elasticiteit van de verbinding kan gewijzigd worden door



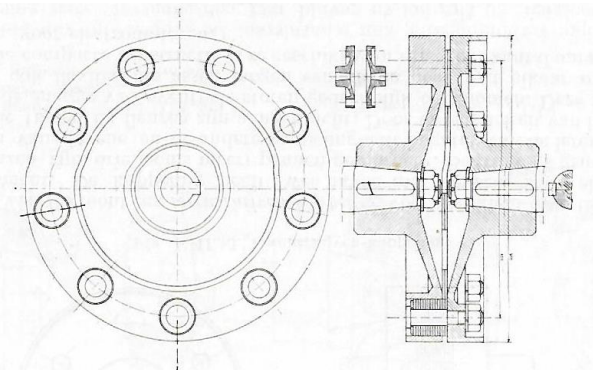
een hardere of zachtere rubbersoort of ander leer toe te passen. De assen hebben een axiale bewegingsvrijheid en kunnen bovendien binnen bepaalde marges uitlijnfouten opvangen. Evenals de leren schijven koppeling isoleert ook dit type koppeling de elektrische machine van die van het aangedreven werktuig.

Eupex-koppeling

Eupex is de naam die de sinds begin 1900 in Bocholt, Duitsland, gevestigde tandwielkastenfabriek Flender aan een breed scala aan flexibele koppelingen geeft.

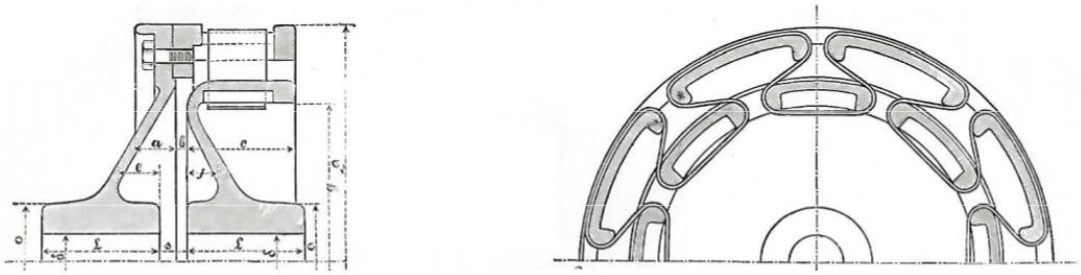
Andere versies van de Eupex-koppeling hebben geen platte elastische pakketjes maar evenals de hierna behandelde leren hulzen-koppeling, ronde rubberen hulzen, die over en weer met borst-bouten aan de koppeling-helften zijn bevestigd. De koppelingen zijn gemaakt van gietijzer.

Bij de hier onder afgebeelde leren hulzen koppeling wordt het moment overgebracht door borstbouten of pennen, die door leren kussens zijn omringd. De tot een huls opeen gestapelde leren ringen zijn weinig elastisch. Rubber hulzen zijn elastischer echter, tenzij gemaakt van synthetisch rubber, minder goed bestand tegen oliën en brandstoffen. Ook deze koppeling kan enige uitlijnfouten opvangen en is niet geleidend.



Leren-hulzen koppeling

Hier onder staat een koppeling afgebeeld die is uitgerust met een leren band. De koppeling bestaat uit twee schijven, elk met ten opzichte van elkaar verschoven nokken waaromheen een leren band is gespannen. Het leer bij deze koppeling wordt op trek belast wat de gewenste elastische werking veroorzaakt. Als gevolg van de relatief kleine doorsnede van de riem kunnen met deze koppeling geen grote koppels worden overgebracht. Ook deze koppeling isoleert de elektrische machine van het aangedreven werktuig en kan uitlijnfouten opvangen.

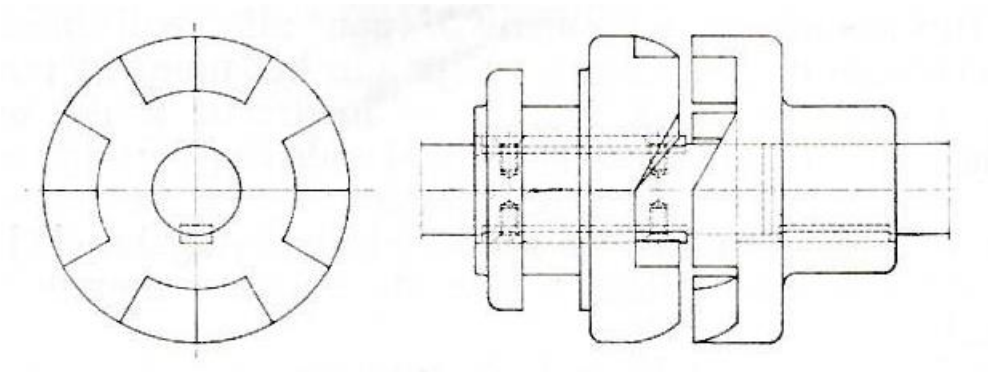


Bandkoppeling (Patent Zodel-Voith)

Uitklink koppeling

Uitklink koppelingen kunnen gedurende het bedrijf worden ontkoppeld doch slechts worden ingeschakeld als de assen een zeer geringe snelheid ten opzichte van elkaar hebben. De eenvoudigste uitklink koppeling is de klauwkoppeling. Ze vertoont enige overeenkomst met de expansiekoppeling. De koppeling-helft op de drijvende as is vast opgespied. De koppeling-helft op de gedreven as is verschuifbaar langs inlegspieën door middel van een hefboom met een vork die in een rondgaande groef met rechthoekige doorsnede grijpt. Om het inschakelen bij stilstaande as

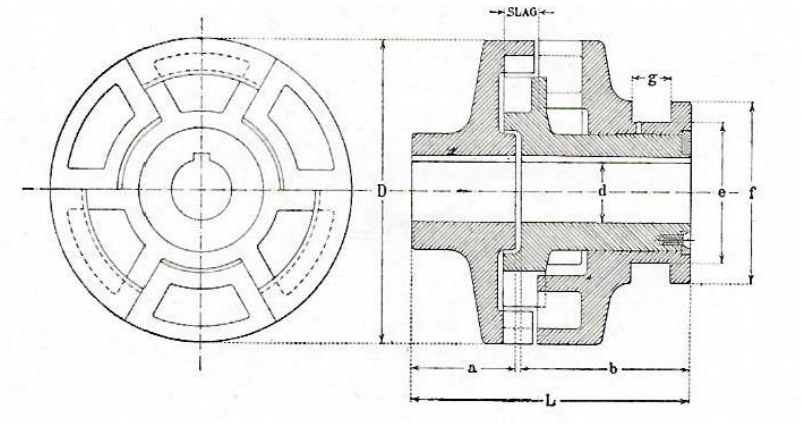
te vergemakkelijken zijn de beide helften van klauwen voorzien. De klauwen of tanden hebben radiale drukvlakken maar schuine ruggen. Dit betekent dat deze koppeling slechts geschikt is voor één draairichting, namelijk die waarin het wringend moment werkt.



Klauwkoppeling

Bij volle belasting is een grote kracht nodig om deze koppeling uit te schakelen omdat er door de geringe afstand van de drukvlakken van de klauwen en de inlegspieën tot het hart van de as grote omtreks- en wrijvingskrachten ontstaan. De axiale ontkoppelingskracht moet door de lagers van de assen kunnen worden opgenomen. De inlegspieën slijten bij het ontkoppelen sterk, waardoor ruimte ontstaat die tot gevolg kan hebben dat deze kantelen. Om deze reden wordt de verschuifbare klauw van twee tegenover elkaar liggende spieën voorzien of worden getande assen toegepast.

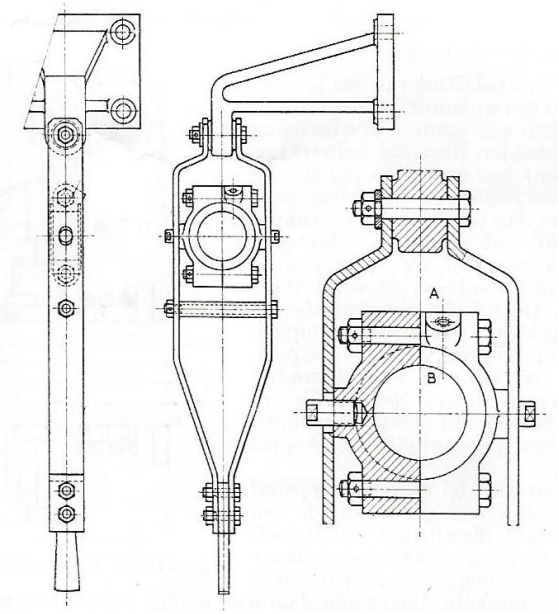
Bij de hier onder afgebeelde Hildebrandt-koppeling is een groot aantal van de bezwaren van de klauwkoppeling opgeheven. De koppeling bestaat uit drie delen. Hiervan zijn twee delen; schijven elk op een aseind gespied. Deze schijven zijn van uitsteeksels voorzien: de linker schijf aan de buitenomtrek de rechter aan de binnenomtrek. Tussen deze uitsteeksels kunnen de uitsteeksels van de derde, verschuifbare schijf worden geschoven zodat het koppel wordt overgebracht. Bij deze constructie zijn voor het verschuifbare gedeelte geen spieën meer nodig, terwijl de uitschakelkracht kleiner is door de grotere afstand van de drukvlakken tot het hart van de as.



Hildebrandt-koppeling

Schakelmechanisme

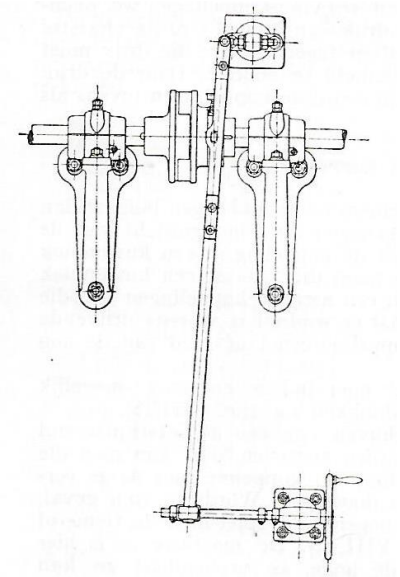
Voor het in werking zetten van de hiervoor besproken inklinkkoppeling voor niet al te grote koppels is een hefboom constructie voldoende. Een en ander zoals hier onder is afgebeeld.



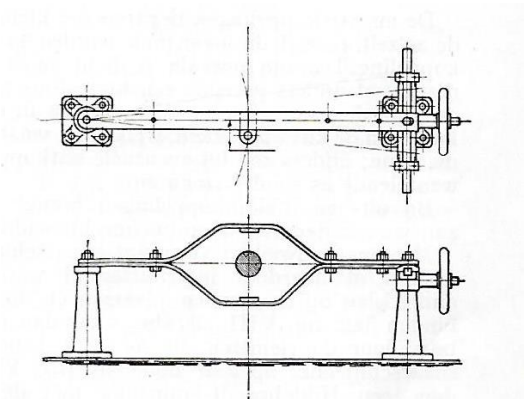
De hefboom bestaat uit een gietijzeren of plaatstalen hefboom met aan het ene eind het handvat en aan het andere eind een vast draaipunt. Daartussen is een uit twee delen bestaande sleepring gemonteerd die in de groef van de koppeling past. Door ovale gaten in de hefboom en pennen aan de sleepring verstelt eerstgenoemde de sleepring en daarmee de koppeling-helft. Op de sleepring is een smeerpot aangebracht. Soms wordt op de hefboom een zekering in de vorm van een pen aangebracht om te voorkomen dat door trillen de koppeling zichzelf in- of uit werking stelt. In beide posities mogen geen axiale krachten door de sleepring op de koppeling worden uitgeoefend.

Handbediend schakelmechanisme

Treden bij het in- of uitschakelen grote krachten op dan verstelt men de hefboom met een schroefspindel of een rondsel met tandheugel. In de afbeelding hier onder zien we aan de linkerzijde een voorbeeld van een schroefspindel schakelinrichting en aan de rechterzijde een met een rondsel en een tandheugel.



Schakelhefboom bewogen door schroef



Schakelhefboom bewogen door rondsel en heugel

De schakelhefboom met de schroefspindel kan zelf-remmend worden uitgevoerd; die met het rondsel en de tandheugel moet worden vastgezet in de gewenste positie.

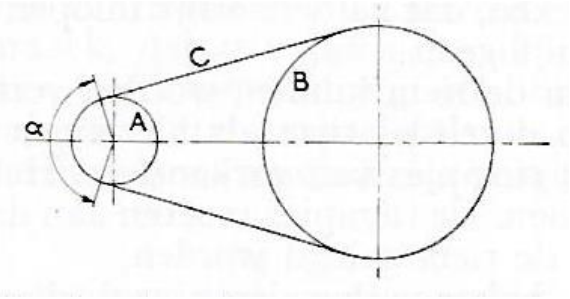
Inklink- of wrijvingskoppeling

Een stilstaande as mag slechts geleidelijk door een draaiende as in beweging worden gebracht. Het plotseling tot stand brengen van de verbinding zou tot breuk van de assen of de koppeling zelf kunnen leiden. Verder zijn er op het moment van inschakelen zeer grote koppels nodig die door de drijvende machine moeten worden opgebracht en niet tot stilstand hiervan mag leiden. Daarom zijn inklinkkoppelingen meestal wrijvings- of frictiekoppelingen. Anders dan bij dieselgemalen zijn van de stoomgemalen in Nederland geen voorbeelden bekend waarbij gebruik werd of nog wordt gemaakt van dit soort koppelingen; daarom blijven ze in deze leidraad buiten beschouwing.

4.17.2 De indirecte overbrenging

Riemoverbrenging

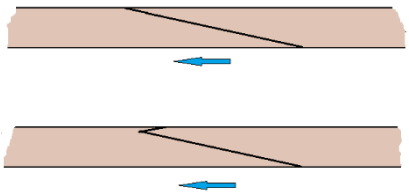
De overbrenging van de draaiende beweging tussen assen kan geschieden door middel van wielen en een verbindend orgaan, Dat orgaan kan een riem, snaar of ketting zijn. Gelijktijdig met het overbrengen kan, door wielen te kiezen van verschillende diameter, het toerental en daarmee ook het koppel worden gewijzigd en in sommige gevallen ook de draairichting. Bij dit soort overbrengingen liggen de hartlijnen van de assen op enige afstand van elkaar en kan de onderlinge opstellingshoek van de assen verschillen; bijvoorbeeld haaks op elkaar.



Overbrenging door wielen en overbrengingsorgaan

Bij de riemoverbrenging maakt men gebruik van drijfriemen die gemaakt zijn van runderleer. Ossenleer is hiervoor het meest geschikt alhoewel ook het minder homogene koeleer wordt toegepast. Het leer van de ruggengraat, het kernleer, is het meest geschikt. Zo'n huid is daar op een strook van ca 200 mm breedte ongeveer 5 mm dik; naar de zijden neemt de dikte, gemeten in gelooide toestand, toe tot 8-9 mm. De maximale breedte van een drijfriem is 500 – 600 mm, bij uitzondering 1000 mm. Bredere riemoverbrengingen maakt men door meerdere riemen naast elkaar te leggen. Men kan ook om een groter koppel over te brengen twee riemen met de vleeszijde op elkaar leggen. We noemen dit een dubbele riem. Deze zijn minder buigzaam dan enkele riemen en maken een grotere riemschijfdiameter noodzakelijk. Riemen gemaakt van zogenoemd chroomleer zijn buigzamer en beter bestand tegen vocht ,warmte en chemische invloeden dan riemen uit leer, dat op de gewone wijze is gelooid. Chroomleer wordt verkregen door de huid te looien met synthetische stoffen op basis van chroom, zoals natrium- en kaliumbichromaat, in plaats van het natuurproduct looizuur of gallotannine gewonnen uit de schors van de Eik of de Sequoia.

De verschillende stukken, met een lengte van 1,2 – 1,5 m, van een gewone leren riem worden door lijmen aan elkaar verbonden. Hiertoe wordt de riem over een lengte van 15 – 25 keer de dikte van de riem, schuin afgewerkt zodat er ter plaatse van de las geen verdikking van de riem ontstaat. Bij het afschuinen en opleggen van een gelijmde riem moet er op gelet worden, in verband met de looprichting, dat de laspunten niet worden losgestoten. De binnenkant van de riem moet dus naar het spitse deel aflopen. Als de riem aan beide zijden wordt opgelegd, zoals meestal het geval is bij spanrollen, dan moet de las worden uitgevoerd zoals bij de onderste afbeelding in de figuur hiernaast is aangegeven.



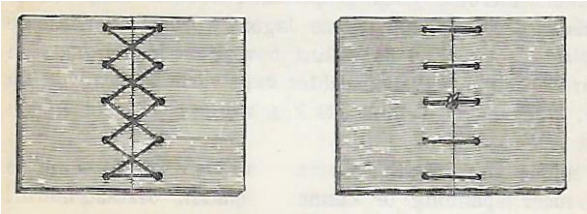
Riemlas voor één- en tweezijdige oplegging

Als lijm gebruikt men houtlijm met Venetiaanse terpentijn en een beetje azijn. Voor riemen in vochtige ruimten gebruikt men de thermoplast celluloid, opgelost in ijsazijn dat stolt bij 17 ºC of aceton. Na het aanbrengen van de lijm worden de delen samengeperst. De sterkte van de las

bedraagt 70 – 80 % van de volle riem. Vaak worden voor grotere zekerheid de delen vervolgens nog verbonden met speciale riempjes van varkensleer. Deze riempjes worden gevlochten door met een holpijp of een hete naald aangebrachte gaatjes in de beide riemeinden.
Nieuwe riemen worden in de fabriek ten minste één of meerdere dagen door aangehangen gewichten of een speciale rekmachine opgerekt met een belasting van twee- tot driemaal de te verwachten riemspanning. Ook worden hiervoor speciale inloopmachines gebruikt. De riem krijgt hierdoor een blijvende verlenging van 4- 5 % en hoeft dus later minder nagespannen of ingekort te worden.
Meestal laat men de vleeszijde van de huid op de schijf lopen. Uit proeven is echter gebleken dat de haarzijde na verloop van tijd een betere grip op de gladde schijf geeft.
Als de riem niet in zijn geheel kan worden opgelegd, omdat deze moet worden ingekort of bij breuk, dan worden op locatie de riemeinden met elkaar verbonden. Hiervoor worden de volgende technieken toegepast:

- Door middel van lijmen op de wijze zoals hier voor beschreven. Het verlijmen van de las, met name het uitharden van de lijm, duurt lang en vereist goede materialenkennis en vakmanschap van degene die de las moet maken. Voor een noodreparatie bij riembreuk is dit geen voor de hand liggende optie en zal moeten worden uitgeweken naar een van de volgende mogelijkheden.

- Door naaien met riempjes van varkensleer. Het is daarbij wenselijk de riemeinden zoals hier voor is aangegeven af te schuinen, vervolgens de gaatjes aan te brengen en de delen met een zogenoemde kruissteek aan elkaar vast te naaien. De gekruiste steek komt aan de zijde van de riemschijf terwijl de rechte steek waar de bindriem dubbel ligt en de knoop van de beide einden van de bindriem is gemaakt, aan de buitenkant of de haarzijde van de drijfriem wordt gelegd. In sommige gevallen, bijvoorbeeld als er onvoldoende riemlengte beschikbaar is, worden de riemeinden ook stomp tegen elkaar gelegd en op dezelfde wijze vastgenaaid.



Genaaide riemverbinding

- Door krammen, haken, scharnieren en dergelijke voor noodreparaties en als de drijfriem vaak moet worden ingekort. Hiervan is de methode met krammen een van de meest toegepaste en het eenvoudigst uit te voeren. In de handel zijn hiervoor op stevig karton bevestigde stroken met krammen te verkrijgen. De krammen hebben om en om een verschillende lengte om de riem zo min mogelijk te verzwakken. De strook krammen ter breedte van de riem wordt voor het aanbrengen op de kopse zijde voorzien van een stalen naald en met een hamer of een speciaal hiervoor gemaakt nietapparaat in de stomp afgesneden einden van de drijfriem gedreven. Door de openingen die na het verwijderen van de naald aan de koppen van de krammen ontstaan wordt een pees van kattendarm, tegenwoordig kunststof, gestoken. De verbinding is tamelijk stug, verzwakt de riem en veroorzaakt stoten en daardoor hinderlijk geluid bij het passeren van de desbetreffende riemschijven.

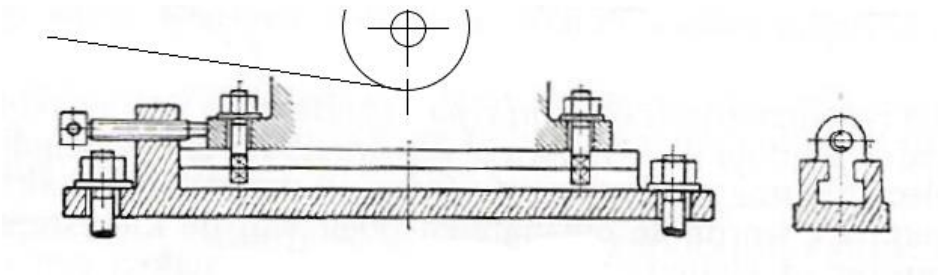
Kramverbinding bij platte drijfriem

Bij machines met een hoog toerental worden uitsluitend gelijmde en eindloze riemen toegepaste omdat andere methoden de riem minder buigzaam maken , waardoor naast hinderlijk geluid schadelijke stoten optreden. De levensduur en de goede werking van een leren riem worden beïnvloed door de vochtigheid van de lucht waarin hij gebruikt wordt. Daarom heeft men riemen samengesteld uit rubber, balata of latex, linnen, katoen, hennep, haar en zelfs zijde .
Bij gemalen toegepaste soorten hiervan zijn de rubber- en balatariemen. Deze riemen bestaan uit lagen katoenweefsel met daar tussen rubber of aanverwante rubber producten die tot doel hebben het verschuiven van de katoenlagen te verhinderen. Ze zijn uitermate geschikt voor vochtige ruimtes maar zijn niet bestand tegen olie of sommige olieproducten.

Riembedrijf

De drijvende schijf bij riembedrijf neemt de riem mee, en deze neemt op zijn beurt de gedreven schijf mee door de wrijving tussen riem en schijf. Deze wrijving ontstaat door de spanningen, die in de beide riemgedeelten optreden.
De riemsnelheid van het getrokken part is iets, ten hoogste 1%, kleiner dan het trekkende part: dit verschijnsel noemen we riemslip. Daardoor is de omtreksnelheid van de gedreven schijf ten hoogste 1 % kleiner dan die van de drijvende schijf. Deze slip openbaart zich in de vorm van warmteontwikkeling en mag dus niet te veel zijn.
De spankracht die noodzakelijk is voor het overbrengen van het koppel wordt bij een horizontale oplegging teweeg gebracht door het gewicht van de riem zelf en door deze bij het opleggen te rekken dan wel gebruik te maken van een spanslede of gewicht belaste spanrollen.

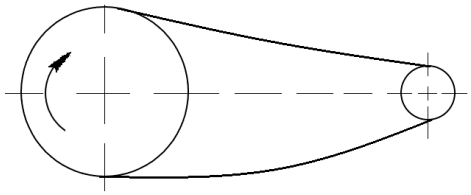
De riem moet ongeveer 1,5 % van de lengte korter gemaakt worden dan de lengte na het opleggen zal bedragen. Riemen boven de 100 mm worden daarom na het opleggen in het werk met behulp van een riemspanner opgerekt waarna de riemeinden verbonden worden. Iedere riem rekt in het bedrijf en vooral een nieuwe riem moet daarom herhaaldelijk worden ingekort, behalve wanneer spansledes kunnen worden toegepast. Het inkorten van de riem is een tijdrovend werk wat men wel eens ten koste van de levensduur van de riem en de lagers trachtte te omzeilen door de riem verder op te rekken dan noodzakelijk en zodoende het interval tussen de inkortmomenten te verlengen.
Wanneer men gebruik maakt van een spanslede dan wordt het aandrijfwerktuig op een slede bevestigd. De slede bestaat uit twee evenwijdig aan elkaar op een fundatieplaat bevestigde rails. Het aandrijf- werktuig, in het hier onder gegeven voorbeeld een elektromotor, is met hamerkop bouten op deze rails vast- gebout. Het aandrijfwerktuig wordt met twee aan de fundatieplaat bevestigde schroefogen en de daarbij behorende stelschroeven net zo lang versteld tot de juiste riemspanning is bereikt. Na het stellen worden de hamerkop bouten aangehaald.



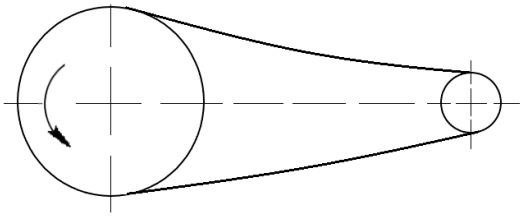
Spanslede

De hartlijn van de schijf op het aandrijfwerktuig moet parallel lopen aan die van de schijf van het aangedreven werktuig om te voorkomen dat de riem van de schijf loopt. Bij het stellen maakt men daarom gebruik van een stalen rij die men tegen de kop van de aandrijfschijf legt. De rij moet dan in het verlengde liggen van de denkbeeldige lijn die de kop van de aangedreven schijf raakt. Men kan bij het richten ook een andere methode volgen, namelijk door gebruik te maken van een metselkoord of een pianosnaar. Het strak over de koppen van de twee schijven getrokken koord of snaar moet de randen hiervan overal net raken.

De aangelegde rekspanning zal het best voldoen bij horizontale riemen: het riemgewicht werkt dan mee om zoveel als mogelijk de riem in contact te houden met de riemschijf. Hierbij moet men de draairichting zo kiezen dat het trekkende part onder komt te liggen. De door de riem op de riemschijven omvatte hoek is, zoals hierna is geïllustreerd, het grootst.



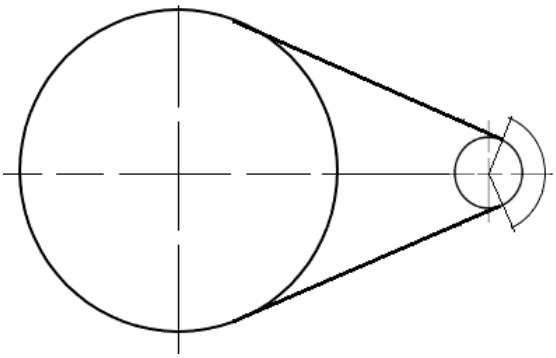
Losse part onder



Losse part boven

Bij een grote overbrengingsverhouding i wordt de omvatte hoek op de kleine schijf klein, vooral als de riem kort is dat wil zeggen als de assen dicht bij elkaar liggen. Men gaat daarom in de praktijk niet boven een i = 2 tot 3. In ieder geval moet de i < 5 zijn.
Voor de minimum hartafstand H neemt men bij horizontaal geplaatste riemen:

$$H = D_1 + D_2 + 2 \quad [m]$$



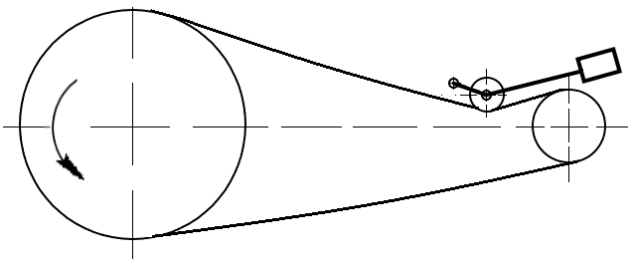
Voor verticaal geplaatste riemen is deze afstand

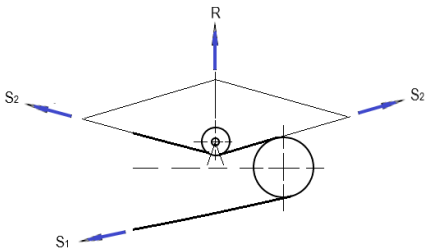
$$H = D_1 + D_2 + 3...4 \quad [m]$$

De maximum waarde voor H is 5 m voor riemen tot een breedte van 100 mm, bij bredere riemen ongeveer 10 m. Wordt H te groot dan gaan de riemen slaan of klapperen, vooral als de belasting schommelt.

Grote overbrengingsverhouding en kleine schijfafstand

Een veel toegepaste methode voor het spannen van de riem is deze te voorzien van een zogeheten spanrol in het losse part. De omspannen boog, dus het contactvlak, neemt hierbij toe terwijl de riem steeds op dezelfde spanning wordt gehouden. De riem heeft iets meer te lijden van de tegengestelde en sterke doorbuiging.





Spanrol met gewichtsbelaste hefboom

Het gewicht G dat nodig is voor het spannen van de riem vinden we met behulp van de kracht S_2 in het afgaande part van de riem en het nominaal over te brengen vermogen van de aandrijving. Zonder dit hier verder af te leiden bestaat de volgende relatie tussen de door het aandrijfwerktuig op de riemschijf uitgeoefende omtrekkracht K en de krachten in het trekkende part S_1 en in het losse part S_2.
De omtrekkracht leiden we als volgt af uit het nominale vermogen N van het aandrijfwerktuig, het toerental n van de machine en de middellijn D van de aandrijfschijf.

$$P = \frac{K\,.\,v}{75}\ [pk]$$

Hierin is v de omtreksnelheid:

$$v = \frac{\pi.D.n}{60}[m/s]$$

De twee vergelijkingen samengevoegd geeft:

$$K = \frac{75.60.P}{\pi\,.D\,.n}\ [pk]$$

Verder bestaat de volgende relatie tussen de omtrekkracht K en de krachten S_1 en S_2, respectievelijk het trekkende en het losse part:

$$K = S_1 - S_2\ [kg]$$

En voor de riemkracht verhouding tussen de twee parten:

$$\frac{S_1}{S_2} = e^{f.\alpha}$$

Hierin is *e* de natuurlijke logaritme met het grondtal 2,71827, f de wrijvingscoëfficiënt die voor een leren riem op 0,28 wordt gehouden en α de door de riem omspannen boog van de aandrijfschijf uitgedrukt in radialen.
Neemt men als voorbeeld een half omspannen cirkelboog dus α = π radialen en f = 0.28 dan wordt de krachtverhouding:

$$\frac{S_1}{S_2} = 2{,}7828^{\,0{,}28\,x\,3.14} = 2{,}408$$

In de praktijk rekent men meestal met 2.

Uit het voorgaande volgt:

$$S_1 = \frac{e^{f.\alpha}}{e^{f.\alpha} - 1}K$$

En:

$$S_2 = \frac{1}{e^{f.\alpha} - 1}K$$

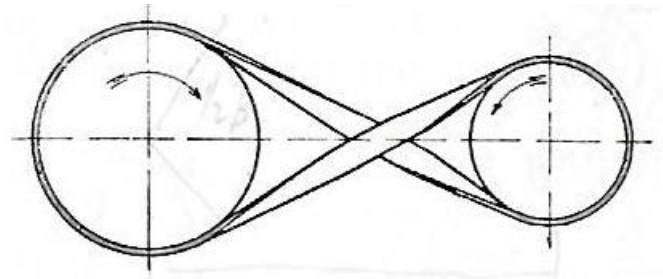
De in het voorbeeld van de gewicht belaste spanrol bedraagt de factor $e^{f.\alpha}$ 2,78, waarbij is gerekend met een omspanhoek α van 210º, en een wrijvingscoëfficiënt f van 0,28.
Heeft de aandrijving uit dit voorbeeld een vermogen van 30 pk, een toerental van 970 omw/min en een aandrijfschijf met een diameter van 250 mm dan komt op de aandrijfschijf een omtrekkracht 178 kg te staan. Dat betekent dat de riemkracht S_2 in het losse part 100 en de resultante R van de hierdoor op de spanrol uitgeoefende krachten 53 kg bedraagt. De hefboom reduceert deze kracht met ruim 25 % zodat met ongeveer een gewicht van 14 kg de juiste riemspanning kan worden gegenereerd.
In de stilstaande riem zullen krachten S_0 moeten optreden die bij benadering kunnen worden gelijkgesteld aan het gemiddelde van de krachten in de beide riemparten als de riem in bedrijf is dus:

$$S_0 = \frac{S_1 + S_2}{2} \ [\mathrm{kg}]$$

In het voorbeeld met de spanrol is S_1, 278 kg en S_2, 100 kg . Dit betekent bij stilstaande riem een kracht S_0 van 189 kg.

Men maakt de kleinste schijf indien mogelijk D ≥ (50… 60). δ, als δ de dikte van de riem voorstelt. Kleinere riemschijven doen de riem sterker buigen waardoor hij sneller slijt. De wrijvingscoëfficiënt tussen de riem en de schijf wordt sterk verhoogd als de riem van tijd tot tijd wordt schoongemaakt en vervolgens ingevet wordt met een mengsel van 90 % ricinusolie (wonderolie) en 10 % rundertalk of in plaats daarvan 2 delen traan en 1 deel talk. Hars, dat wel eens gebruikt wordt tegen slippen, is uit den boze omdat het de riem hard en minder buigzaam maakt waardoor deze sneller breekt.

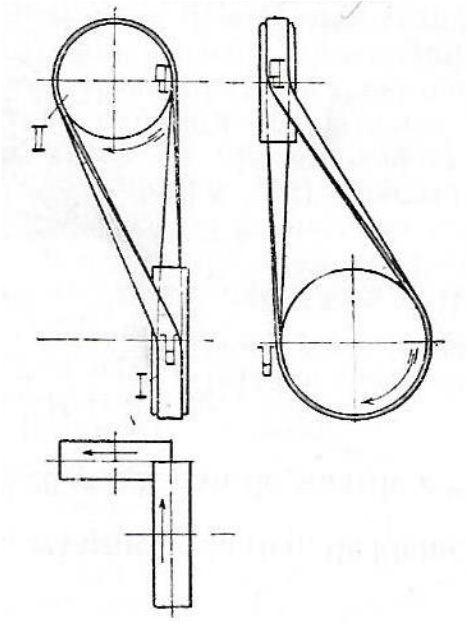
Bij open riemen wentelen de schijven in dezelfde richting. Moeten zij in tegengestelde richting draaien , dan wordt de riem gekruist. Beide riemgedeelten wrijven hierbij over en langs elkaar, zodat de riem sneller slijt dan een open riem.



Gekruiste riem

Een voordeel van een gekruiste riemoverbrenging is dat de omspannen boog, de hoek α, aanmerkelijk groter is dan bij de open riem.

Wanneer de schijven niet in hetzelfde vlak liggen wordt de riem half gekruist. Bij het ontwerp van een dergelijke riemenloop geldt de voorwaarde dat het aflopende riemgedeelte van een schijf zich in het vlak moet bevinden van de schijf waar het moet oplopen. Hieruit volgt dat het aflopen moet geschieden in een punt van de snijlijn van de vlakken die men door de riemschijven loodrecht op de assen kan aanbrengen. Uit het bovenstaande volgt tevens dat een transmissie met half gekruiste riem slechts voor één draairichting geschikt is.



Halfgekruiste riem

Wegens de door verdraaiing veroorzaakte ongelijkmatige spanning in de riem moeten de schijven iets naar buiten worden verschoven. Bij de drijvende- en de gedreven schijf is dat respectievelijk (0,5…0.6).b en (01,…0,2).b, als b de riem- breedte is.

In werkelijkheid verdraait de riem zich niet om de hartlijn maar om de kortste zijde. Verder mag de aflopende riem geen grotere hoek maken dan 25 graden met de verticaal of horizontaal al naar gelang de opstelling van de transmissie.

Bij half gekruiste overbrengingen neemt men de gedreven schijf 30 % en de drijvende schijf 20 % breder dan gewoonlijk.

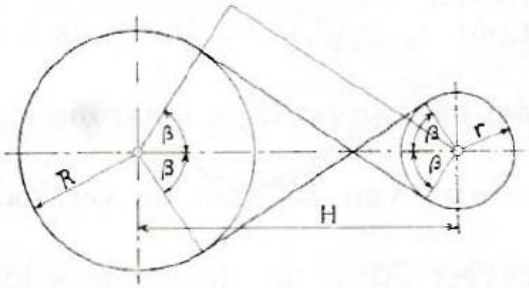
De afstand van de assen voor half gekruiste riemoverbrengingen ≥ 4 D, als D de diameter is van de drijvende schijf.

De riemlengte L voor een gekruiste riem kan men aan de hand van de hartafstand H van de assen en de diameters R en r van de schijven als volgt nauwkeurig berekenen:

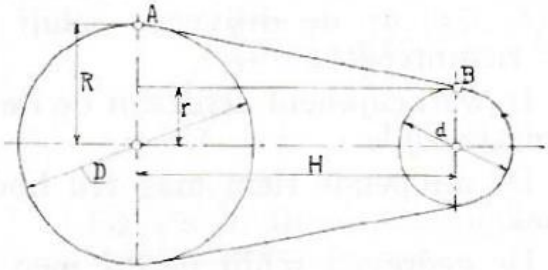
$$L = 2.\left(H\,.\,\sin\beta + (R + r)\,.\,(\pi - \beta)\right)\ [m]$$

Hierbij wordt hoek β bepaald door:

$$\cos\beta = \frac{R + r}{H}$$



Schema voor bepalen riemlengte gekruiste riem

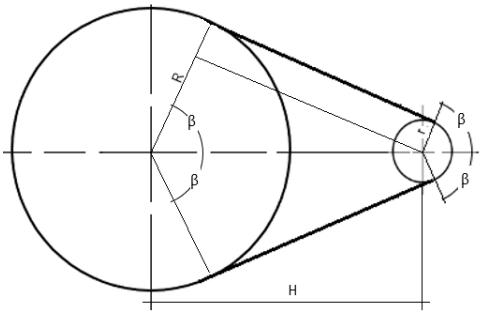


Schema voor bepalen riemlengte open riem

Een overeenkomstige berekening voor een open riemoverbrenging met niet al te grote verschillen tussen de drijvende en de gedreven schijf luidt:

$$L \approx \pi.(R+r) + 2.\sqrt{H^2+(R+r)^2} \ [m]$$

Als de diameters van de schijven wel veel verschillen kan de riemlengte met een van de gekruiste riem afgeleide formule nauwkeurig worden berekend. Voor deze open riemoverbrenging luidt de formule:



$$L = 2.(H.\sin\beta + R.(\pi-\beta) + r.\beta) \ [m]$$

Hierbij wordt hoek β bepaald door:

$$\cos\beta = \frac{R-r}{H}$$

Open riemoverbrenging

De hoek β wordt niet in booggraden uitgedrukt maar in radialen, met als geheugensteun dat 360 º overeenkomt met 2 π radialen, een halve cirkel 180 º is dus π radialen. Bij het bestellen van een nieuwe riem kan men overigens ook de lengte van de oude riem opmeten of bij het ontbreken daarvan een dunne lijn over de overbrenging spannen en deze na afwikkeling opmeten. In alle gevallen moet men, zoals eerder aangegeven in verband met de rek, de nieuwe riem ongeveer 1,5 % korter maken. De op te meten lengte geldt aan de buitenkant van de riem.

De riem wordt berekend op de grootste spanning die er in voorkomt. Dit is in het trekkende part met een trekkracht:

$$S_1 = \frac{e^{f.\alpha}}{e^{f.\alpha}-1}K$$

Deze trekkracht veroorzaakt een trekspanning:

$$\sigma_s = \frac{e^{f.\alpha}}{e^{f.\alpha}-1}.\frac{K}{F}$$

Hierbij is F het oppervlak van de riemdoorsnede:

$$F = b.\delta$$

Bij de afleiding hiervan is geen rekening gehouden met de centrifugaalkracht die op de riem werkt die bij dikke riemen en hoge riemsnelheden beduidend van invloed is op de spanning in de riem. Ten slotte moet rekening worden gehouden met de buiging die de riem ondergaat bij het oplopen op de schijf. Een en ander resulteert er in dat voor drijfriemen een maximale snelheid van 35 m/s

en al naar gelang de kwaliteit van het leer een maximale trekspanning in de riem van 25 … 30 kg/cm² wordt aangehouden. De riemdikte wordt door de huiddikte van het rund bepaald en bedraagt over het algemeen 5 mm.

In de praktijk wordt de riembreedte berekend uit de nuttige omtrekkracht p die een riem met een breedte van 1 cm bij een bepaalde snelheid en een bepaalde schijfmiddellijn kan overbrengen.

Dus:

$$b = \frac{K}{p}$$

Om veel tamelijk complex rekenwerk te omzeilen is voor een groot aantal riembedrijf-situaties een tabel samengesteld waarmee snel de vereiste riembreedte kan worden vastgesteld. Deze tabel geldt voor een horizontaal opgelegde riem van 5 mm dik met het trekkende part onder en een omspannen boog α van de kleinste riemschijf D van 160 º.

	D	Riemsnelheid v in m/s				
	mm	3	5	10	20	30
Enkele riem	100	3,0	4,0	4,3	4,0	2,4
	200	5,0	6,0	6,6	7,0	5,4
	300	6,0	6,5	7,4	7,6	6,4
	400	6,5	7,0	7,8	8,0	6,9
	500	6,7	7,2	8,0	8,4	7,2
	600	7,0	7,3	8,2	8,5	7,4
	750	7,2	7,5	8,4	8,7	7,6
	1000	7,3	7,6	8,6	8,8	7,8
	1500	7,5	7,8	8,7	9,0	8,0
Dubbele riem	400	11,4	12,0	13,3	13,4	10,8
	500	12.2	12.9	14,3	14,5	12,0
	600	12,7	13,5	14,9	15,2	12,8
	750	13,2	14,9	15,5	16,0	13,6
	1000	13,7	14,5	16,1	16,7	14,4
	1500	14,2	15,0	16,7	17,3	15,2
	2000	14,5	15,3	16,9	17,7	15,6

Nuttige omtrekskracht tabel (p = kg/cm)

De aandrijving bij de berekening van het spanrolgewicht heeft een vermogen van 30 pk, een toerental van 970 omw/min, een aandrijfschijf met een diameter van 250 mm en een omtrekkracht van178 kg. De berekende riemsnelheid is 12,7 m/s. Met behulp van interpolatie kan uit de tabel worden afgeleid dat de nuttige omtrekkracht 7,1 kg is.

De drijfriembreedte bedraagt dan:

$$b = \frac{K}{p} = \frac{178}{7{,}1} = 25\ [\mathrm{cm}]$$

Boven een riemsnelheid van 35 m/s loopt de riem gevaar ten gevolge van de centrifugaal kracht van de schijf af te lopen. Hele lage riemsnelheden, lager dan v = 5 m/s, worden eveneens afgeraden. Voor een leren riem moet ook het aantal buigingen w dat de riem per seconde over de schijf moet maken beperkt blijven tot 3…5. Het aantal buigingen berekent men bij een twee-schijven opstelling als volgt:

$$w = \frac{2.v}{L}$$

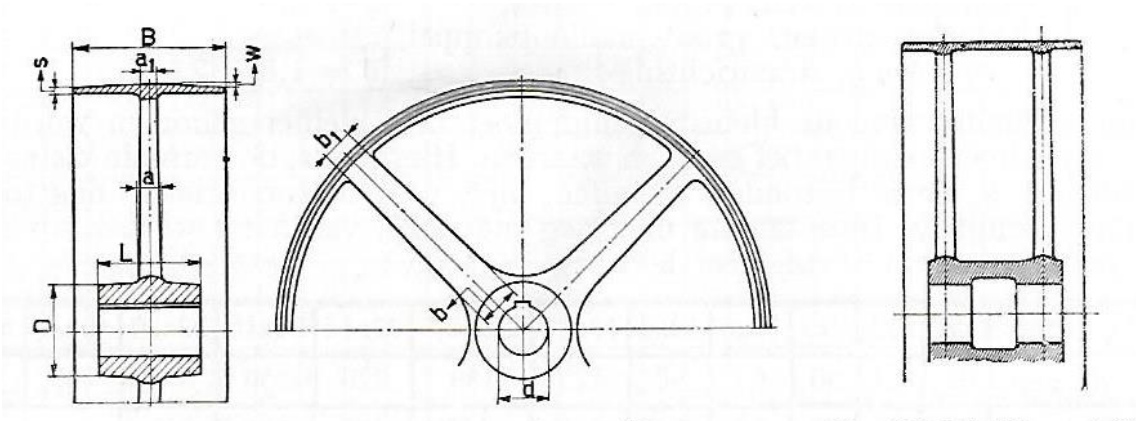
Voor rubber-, balata- en katoenen riemen kan men voor de nuttige omtrekkracht p, 2,5…3,5 kg/cm rekenen. De riemen bestaan uit 4…8 lagen.

Riemschijven

Riemschijven worden vervaardigd uit gegoten ijzer, staal en hout. Houten riemschijven zijn lichter en goedkoper dan gietijzeren en worden daarom veel toegepast. Stalen riemschijven vinden voornamelijk toepassing bij grote riemsnelheden.

Bij open overbrengingen neemt men de breedte van de schijf B ≈ 1,1 . b + 10 mm. Bij gekruiste en half- gekruiste overbrengingen neemt men B = 1,4 . b + 10 mm tot B = 2. b mm.

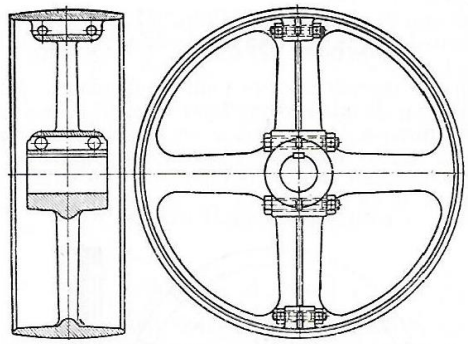
De gietijzeren riemschijf bestaat uit een velg en een naaf waartussen een enkele- of dubbele rij spaken. De spaken worden recht gemaakt. Men beweert dat de voorheen gebruikelijke dubbel gebogen spaakvorm het riemschijfgewicht vergroot, zonder de gietspanningen te voorkomen of de schijf sterker te maken. De spaken hebben voor de sterkte een elliptische doorsnede waarvan de lange as in de draairichting ligt.



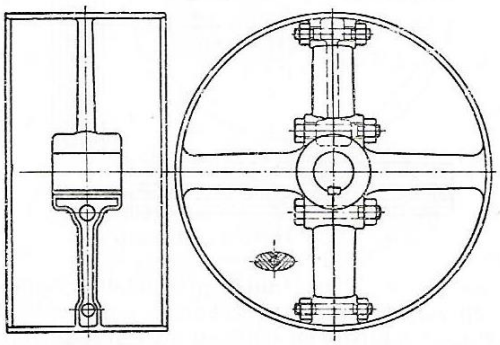
Ongedeelde gegoten ijzeren riemschijf **Schijf met dubbele rij spaken**

Bij open riemen moet het loopvlak van de gedreven riem bol zijn. Aanbevolen wordt bij dubbele riemen en ook bij een riemsnelheid groter dan 25 m/s , de drijvende schijf ook bol te maken.

De welving is 1 mm voor een riembreedte onder de 100 mm, daar boven wordt circa 1% van de riembreedte aangehouden. Alle andere schijven maakt men vlak (cilindrisch). De riem zoekt steeds het hoogste punt van de schijf, zodat eventuele kleine uitlijnfouten niet tot het scheeflopen of tot het aflopen van de riem leiden. Het bol maken van de schijf leidt tot een plaatselijk iets grotere spanning in de riem.
Riemschijven uit twee delen worden na het gieten gekloofd, De raakvlakken van de helften worden vlak bewerkt waarna de helften met bouten weer aan elkaar worden verbonden en vervolgens bewerkt. De deling vindt bij voorkeur plaats over twee tegenover elkaar liggende spaken en niet in de velg.



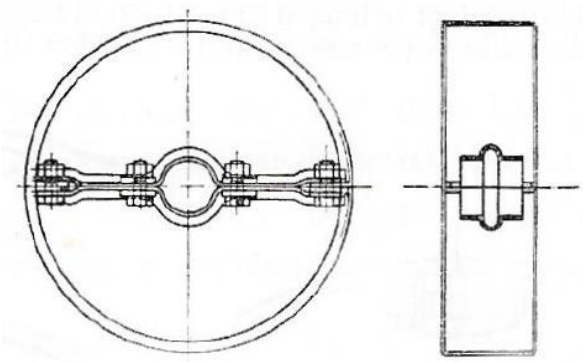
Tweedelige gietijzeren riemschijf



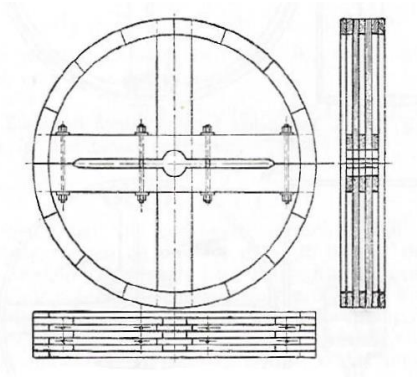
Tweedelige riemschijf

De naaf en het loopvlak worden bij voorkeur in één bewerkingsgang bewerkt zodat het loopvlak van de schijf zuiver centrisch ligt ten opzichte van de naaf. Na het bewerken wordt de schijf gebalanceerd.

De linker figuur hieronder laat een stalen schijf zien uit geperste plaat met een gietijzeren bus als naaf. Dergelijke stalen schijven worden ook samengesteld uit stalen buizen. De constructie wordt dan gelast.



Geperst stalen riemschijf



Tweedelige houten riemschijf

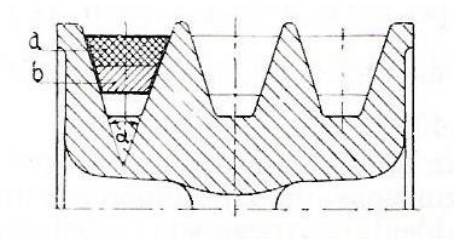
De velling van een houten riemschijf wordt uit segmenten opgebouwd om te beletten dat het hout krom trekt. Daartussen worden de spaken bevestigd.

De riemschijven worden gemaakt van beukenhout, dat onder stoomdruk geweekt en vervolgens in de juiste vorm geperst wordt. De segmenten worden verlijmd, en na het afwerken van de constructie en het zuiver afdraaien van het loopvlak vernist om vochtopneming te voorkomen. Tweedelige houten riemschijven, zoals hierboven weergegeven, kunnen door de verbindings-bouten, bij een niet te grote omtrekkracht voldoende vast op de as geklemd worden. Grotere schijven en schijven uit één stuk vereisen spieën.

Snaar- en kettingoverbrenging

Ter vervanging van de over het algemeen dure leren riemen bij grote vermogens gebruikte men bij grote hartafstanden soms hennep en katoen touwen. Ook werd voor dit doel staaldraad gebruikt. Hierbij zijn altijd grote schijven nodig vanwege de dikte van de touwen en/of de staaldraden. Alhoewel men slijtage van deze touwen en kabels door het bekleden van de schijven trachtte te voorkomen is deze groot. Dit type overbrenging is weinig bekend bij stoominstallaties van gemalen.

Snaren met V-vormige doorsnede worden gebruikt om in ongunstige gevallen, zoals een kleine hartafstand, een grote overbrengingsverhouding of beide, toch nog met een kleine voorspanning uit te komen zonder te veel slip te krijgen. Alhoewel er al in de 19e eeuw sporadisch leren v-snaar overbrengingen werden toegepast vond de ontwikkeling van deze soort overbrenging hoofdzakelijk plaats na het stoomtijdperk. In deze leidraad zal daarom hieraan verder geen aandacht geschonken worden.

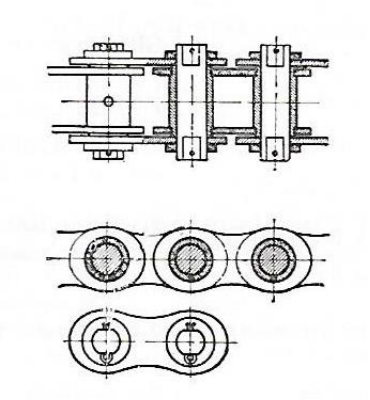


V-snaar met de vorm van de groeven

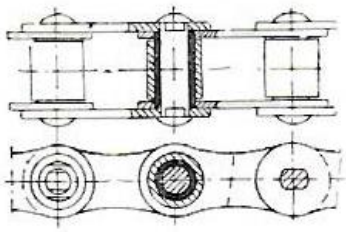
Overbrenging met behulp van kettingen kan onder zeer uiteenlopende omstandigheden toepassing vinden. Zij zijn in het bijzonder geschikt bij kleine hartafstanden van de wielassen. Kettingen zijn slipvrij en vereisen daarom geen voorspanning zodat de assen en de kussenblokken geen extra belasting ondergaan. Voor smering van de ketting en bescherming tegen aanraken en vervuiling door stof moet de ketting worden afgeschermd.

Als transmissie-ketting komt in hoofdzaak de rollenketting in aanmerking. Het is niet bekend of deze soort overbrenging ook is toegepast bij stoomgemalen bij de aandrijving van de opvoerwerktuigen; zij is wel bij apparaten van deze installaties zoals verstelinrichtingen of afsluiter bediening toegepast.

De rollenketting is ontwikkeld uit de busketting, die uit stalen bouten of tappen is samengesteld. Om de grote vlaktedrukken tussen de bout en de binnenste schalm te ontgaan, zet men de binnenste schalmen op een afzonderlijke stalen bus. Hierdoor wordt het draagvlak aanzienlijk vergroot en de slijtage verminderd. De buitenste schalmen kunnen niet draaien om de pennen. Gaatjes in de bussen dienen voor de toevoer van het smeermiddel. Een even aantal schalmen kunnen tot een ketting zonder eind worden verbonden.

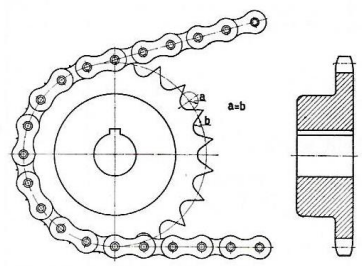


Busketting



Rollenketting

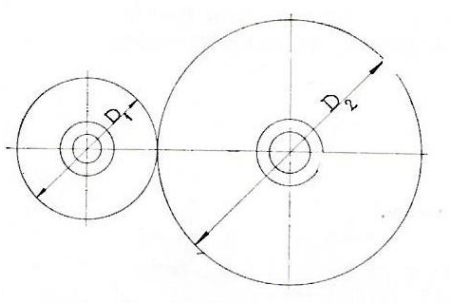
De rollenketting onderscheidt zich alleen van de busketting doordat over de bussen gehard stalen rollen zijn geschoven om de wrijving tegen de tanden van het kettingwiel te verminderen. Deze kettingen worden ook voor twee, drie en vier rijen tanden vervaardigd.
In bedrijf zal de ketting langzamerhand rekken. Door slijtage komt er speling in de scharnieren, waardoor de steek van de belaste ketting groter wordt. De ketting komt dan op een steekcirkel met een grotere straal te liggen. De vorm van de tanden moet dit mogelijk maken. De figuur hiernaast geeft de vorm van de tanden weer, puntig met nagenoeg rechte flanken. De straal van de tandkuilen is gelijk aan die van de rollen. . Bij het rekken van de ketting zal deze steeds verder naar buiten op de tanden lopen. In het aller- uiterste geval schampt deze over de toppen. Een kettingverbinding moet zo zijn ingericht dat de ketting kan worden nagespannen, we kennen dit van onze fietsketting. Als deze constructie niet mogelijk is wordt gebruik gemaakt van een spanwiel.



Kettingwiel voor rollenketting

Tandwieloverbrenging

De overbrenging van de draaiende beweging tussen assen kan geschieden door middel van kam- of tandwielen als verbindend orgaan, De oudste vorm die we hiervan kennen bij stoomgemalen is het met houten tanden bezette kamwiel. Door tandwielen te kiezen van verschillende diameter is het toerental en daarmee ook het koppel te wijzigen. In alle gevallen kan men de draairichting wijzigen en liggen de drijvende as en de gedreven as op enige afstand van elkaar. Deze afstand is anders dan bijvoorbeeld bij riemaandrijving beperkt en wordt bepaald door de grootte van de wielen.



Overbrenging door twee wielen

Door het toepassen van haakse tandwielen kan elk gewenst verschil in de onderlinge opstellingshoek van de assen worden bereikt; bijvoorbeeld zoals die voorkomt bij een vijzelinstallatie die onder een hoek van 30 met de horizontaal staat opgesteld.
Bij de tandwielen grijpt het ene wiel met zijn tanden in de overeenkomstige openingen van het andere wiel. Het drijvende- en het gedreven wiel hebben daarom gelijke snelheid in de bewegingsrichting. Wanneer de beweging in de richting van de omtrek geschiedt, zijn dus de omtreksnelheden van de wielen gelijk behalve bij schroef- en hypoïd vertande wielen alsmede bij wormen en wormwielen.
Als D_1 en D_2 de middellijnen van de wielen voorstellen dan geldt:

$$v_1 = \frac{\pi . D_1 . n_1}{60} = v_1 = \frac{\pi . D_2 . n_2}{60} \quad [m/s]$$

Dus:

$$D_1 . n_1 = D_2 . n_2$$

Of in de vorm van evenredigheid waarbij r de stralen van de respectievelijke wielen zijn:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{r_2}{r_1}$$

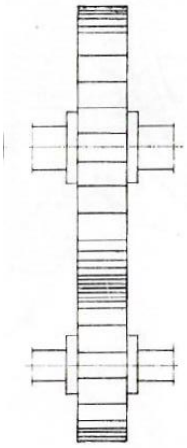
Het verhoudingsgetal i noemen we het transmissiecijfer dat de verhouding weergeeft tussen de toerentallen van de drijvende- en de gedreven- as.
Voor de hoeksnelheid ω, de hoek, uitgedrukt in radialen per seconde en het koppel M geldt hetzelfde verhoudingsgetal. zodat we ook kunnen schrijven:

$$i = \frac{M_1}{M_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{r_2}{r_1}$$

Indeling van de tandwielen
Hierbij onderscheidt men vier gevallen naar de stand die de assen ten opzichte van elkaar innemen.

- De assen liggen evenwijdig aan elkaar (rechte tandwielen)

De grondvorm van deze wielen zijn twee elkaar volgens een beschrijvende lijn rakende cilinders. De tanden kunnen evenwijdig zijn aan de beschrijvende lijnen ervan of er een hoek mee maken met een schuine vertanding.

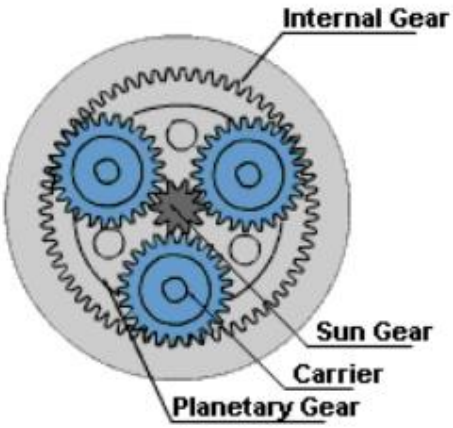


Rechte tandwieloverbrenging met rechte vertanding

Rechte tandwieloverbrenging met schuine vertanding

- De assen liggen in het verlengde van elkaar (rechte tandwielen)

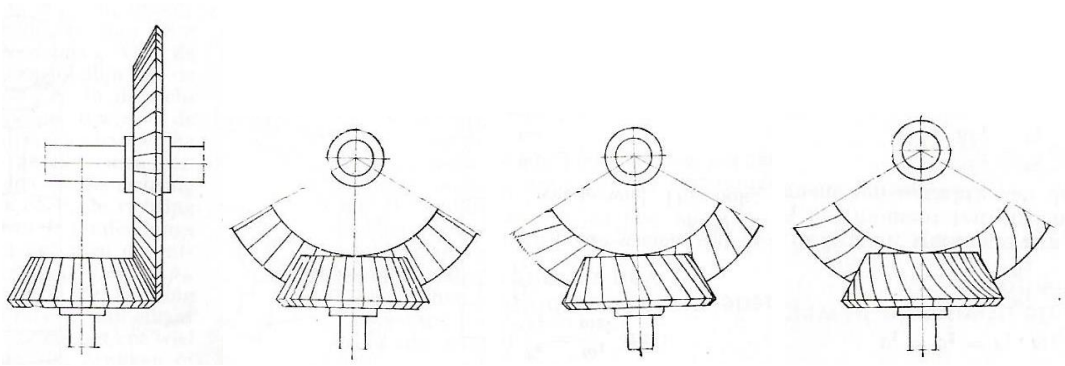
De grondvorm van deze wielen is gelijk aan die met de rechte vertanding, echter de overbrenging vindt in meerdere stappen plaats waardoor de tandwielen zodanig kunnen worden gerangschikt dat de in- en uitgaande- as in elkaars verlengde geplaatst kunnen worden.



Planetaire tandwieloverbrenging

- De assen snijden elkaar (conische tandwielen)

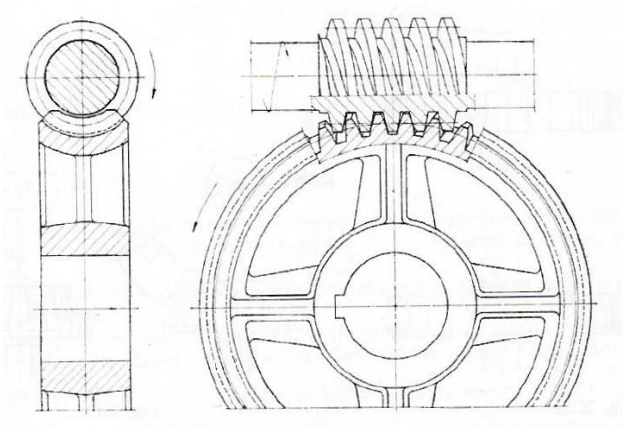
De grondvorm is twee elkaar volgens een beschrijvende lijn rakende kegels met een gemeenschappelijke top. De tanden kunnen recht zijn, dat wil zeggen de beschrijvende lijnen van de tanden snijden elkaar in de top, en scheef of gebogen op de kegelwielen zijn aangebracht.



Conische tandwieloverbrenging met rechte- schuine- en gebogen vertanding

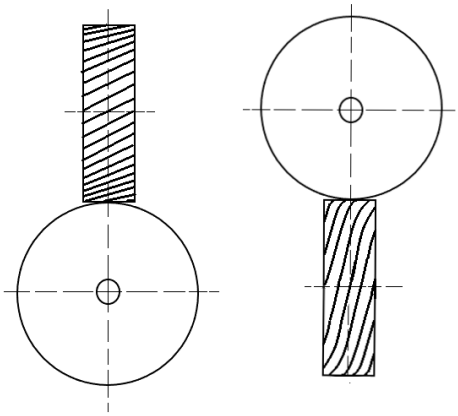
- De assen kruisen elkaar (schroefwielen)

Alhoewel er wel sprake is van vertanding spreekt men bij dit soort overbrengingen meestal over schroefwielen en worm - wormwiel overbrenging.

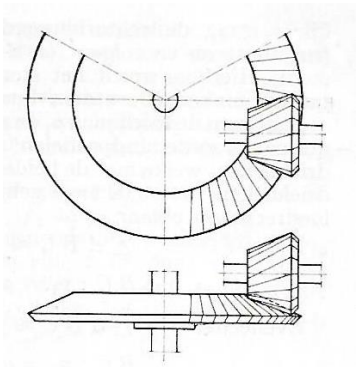


Worm - wormwiel overbrenging

De worm- wormwiel overbrenging wordt veel toegepast waar een grote overbrengverhouding gewenst is zoals bijvoorbeeld bij de aandrijving van een smeertoestel of bij de handbediening van de rookkleppen bij een stoomketel. Het handwiel is dan op de worm-as bevestigd en het wormwiel is verbonden met de as van de rookklep. De zware klep kan dan met een geringe krachtsinspanning worden versteld.



Schroefwiel overbrenging



Hypoïd overbrenging

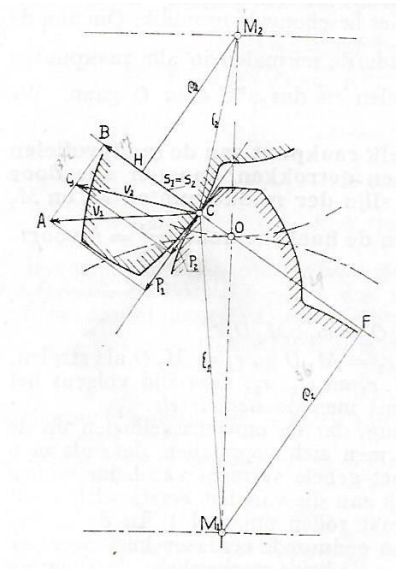
De hier voor afgebeelde en relatief moderne schroefwielen en hypoïd vertande overbrengingen zal men bij de installaties van stoomgemalen niet aantreffen.

Grondbeginsel tandconstructie

Bij een goede tandconstruktie moet er voor gezorgd worden dat de overbrenging gelijkmatig dat wil zeggen zonder schokken plaats heeft. De verhouding van de hoeksnelheiden van het ene en het andere wiel moet steeds gelijk zijn. Of anders geschreven:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \text{constant}$$

Houdt men deze eis in het oog dan kan men het grondbeginsel afleiden. Met behulp van de hiernaast afgebeelde figuur kan worden aangetoond dat de zijden van de gelijkvormige driehoek M_1O en M_2O zich verhouden als loodlijnen op de uit M_1 en M_2 op de gemeenschappelijke normaal van de tandprofielen dus ook als ω_1 en ω_2.



$$i = \frac{M_2\,O}{M_1\,O} = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

De loodlijnen, in elk raakpunt van de tandprofielen op de gemeenschappelijke raaklijnen getrokken, moeten alle door het hetzelfde punt O van de verbindingslijn van de middelpunten M_1 en M_2 gaan.

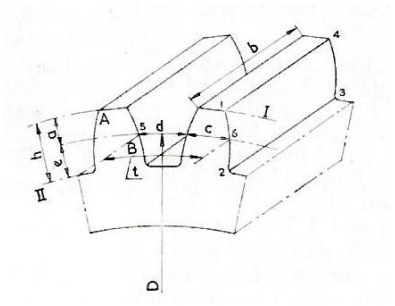
Op twee samenwerkende wielen kan men altijd twee elkaar rakende cirkels met gelijke omtreksnelheid bepalen. Die noemen we de steek- cirkels. De verhouding van hun stralen bepaalt het overbrengingsgetal I. Hun raakpunt is de pool O.

Grondbeginsel van de tandconstructie

Uit de ongelijkheid van p_1 en p_2, de ontbondenen van de omtreksnelheden v_1 en v_2 richting de raaklijn, volgt dat de tanden langs elkaar glijden met een relatieve snelheid van p_1 - p_2 .. Hierdoor ontstaat wrijving en warmteontwikkeling. Raken de tanden elkaar in punt O dan is $v_1 = v_2$ en $s_1 = s_2$ en dus ook $p_1 = p_2 = 0$. Op dit punt treedt rolling van de tandprofielen op en is er sprake van rolwrijving.

Benamingen

Uit het voorgaande kan worden afgeleid dat de tanden van een tandwiel een bepaalde vorm moeten hebben om aan een aantal eisen te kunnen voldoen. De uiteindelijke vorm is een compromis tussen een aantal hierna nader toegelichte mogelijkheden. In de loop van de ontwikkeling van het maken van tandwielen heeft men benamingen bedacht en zijn tandprofielen gestandaardiseerd zodat uitwisselbaarheid bij vervanging gewaarborgd is.



Tand benamingen

In onderstaande tabel zijn de namen die bij de letters in de voorgaande figuur horen, nader aangegeven.

A	Tandkop	e	Voethoogte
B	Tandvoet	h	Tandhoogte
Cirkel I	Kopcirkel	b	Tandbreedte (velgbreedte)
Cirkel II	Voetcirkel	c	Tanddikte (op steekcirkel gemeten)
a	Kophoogte	d	Kuilwijdte (op steekcirkel gemeten)

Benaming bij de tanden van tandwielen

Het vlak 1 2 3 4 in de figuur noemen we het werkend vlak of tandflank en de boog 1 2 het tandprofiel. De boog 5 6 op de steekcirkel = tanddikte + kuilwijdte en noemen we de steek, aangeduid met t. Is het aantal tanden van een wiel z, dan is:

$$O_{stc} = \pi . D = z . t \, [mm]$$

Of:

$$t = \pi . \frac{D}{z} \, [mm]$$

Bij de fabricage van tanden geeft men de steek aan in een veelvoud van π en noemt men de volgende verhouding de modulus of modul of ook wel moduul.

$$m = \frac{t}{\pi} = \frac{D}{z} [mm]$$

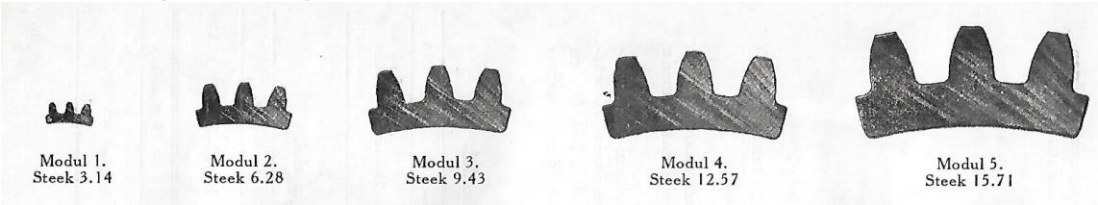
Hieruit volgt:

$$t = m \,.\, \pi. [mm]$$

En:

$$D = m \,.\, z \;\; [mm]$$

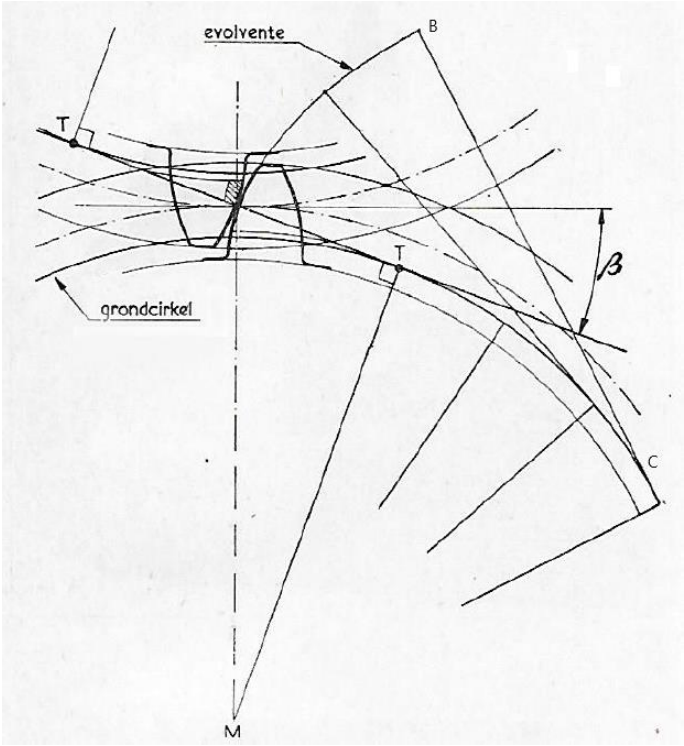
Hierbij is z een geheel getal en m een geheel of meetbaar getal.
Het aantal voor de vervaardiging van tandwielen benodigde gereedschappen beperkt men door voor m een beperkt aantal getallen te kiezen.



Voorbeeld van de modules 1 t/m 5

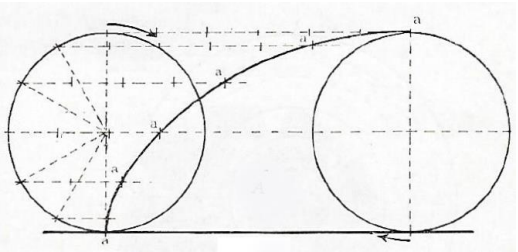
Tandprofielen

Men kan als tandprofiel van de op elkaar ingrijpende wielen een willekeurige kromme aannemen, en daarvan die van het andere wiel afleiden.
In de praktijk beperkt men zich tot evolventen of, voor bijzondere doeleinden, van cycloïden. Een evolvente is de baan, die een punt van de raaklijn aan een cirkel beschrijft als men de raaklijn over de cirkel laat rollen.
De evolvente ontstaat als een strak gespannen draad, die op de cirkel, de grondcirkel, is gewonden, daarvan afwikkelt. Trekt men vanuit een punt B van de evolvente een raaklijn BC aan de grondcirkel, dan kan men dat als een klein deel van de evolvente beschouwen.

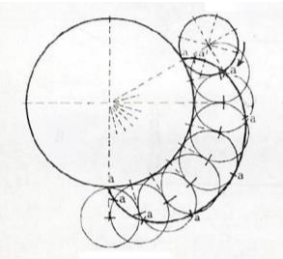


Evolvente

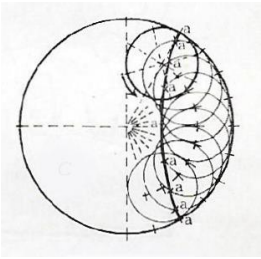
Bij de cycloïde-tandconstructie worden de tandprofielen gevormd door zogenoemde cycloïden. Men onderscheidt de gewone cycloïde waarbij de kromme beschreven wordt door een punt van een cirkel, die afrolt op een rechte lijn en de epicycloïde (epi = boven) waarbij de kromme ontstaat door het afrollen van een cirkel op een andere cirkel. Dan is er ook nog de hypocycloïde waarbij de kromme ontstaat door het afrollen van een punt van een cirkel binnen een andere cirkel.



Cycloïde



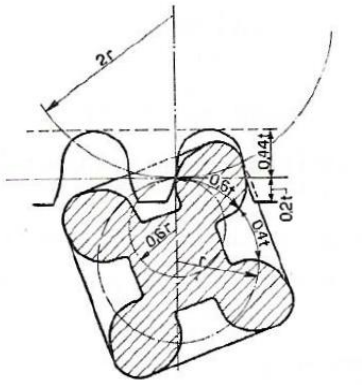
Epicycloïde



Hypocycloïde

Cycloïde tandprofielen worden vaak toegepast bij rondsels in combinatie met een tandheugel zoals hierna afgebeeld. Het tandprofiel van de heugel, dat verkregen wordt door de beide rolcirkels op de steekcirkel te rollen, bestaat uit twee gewone cycloïden. Door de tandvoet lager dan normaal te maken wordt de tand minder verzwakt, terwijl de verkorting van de ingrijping die dientengevolge zou ontstaan, wordt vermeden door de tandkop hoger te maken dan normaal. Opdat de voet en de kop dik genoeg worden, moet de tanddikte groter dan normaal worden genomen.

Het afgebeelde rondsel op hier onder is gemaakt door de tandkuilen uit een vierkant stuk staal te frezen. De tanden worden daardoor behalve aan de voet ook aan de zijkanten gesteund.

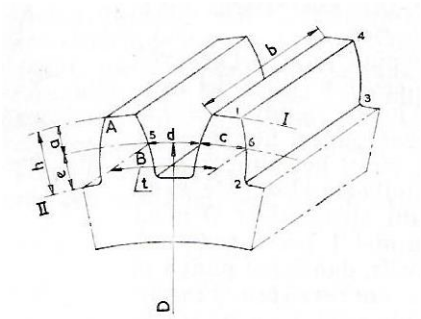


Cycloïde vertand rondsel met heugel

Bepaling van de afmetingen van de tanden.

Onbewerkte tanden

De tandwielen bij oude stoomgemalen zoals bijvoorbeeld voor een scheprad aandrijving zijn vaak gemaakt van gietijzer. De tanden ervan werden behoudens het ontbramen en het weghakken en of vijlen van oneffenheden niet bewerkt. Niet zelden werkten deze gietijzeren wielen of rondsels samen met wielen met houten tanden. Wielen met onbewerkte tanden hebben daarom andere afmetingen en hebben grotere maattoleranties nodig dan die waarvan de tanden nauwkeurig machinaal zijn bewerkt.



Tand benamingen

Voor de kophoogte a wordt aangehouden:

$$a \approx m \approx 0{,}3\,(c + d) \approx 0{,}3t \;\; [\mathrm{mm}]$$

Voor de voethoogte e van de tand van het andere wiel rekent men met:

$$e \approx (1{,}15 \ldots 1{,}2).\,m \; [\mathrm{mm}]$$

Of:

$$e \approx 0{,}4\,t \;\; [\mathrm{mm}]$$

De twee samenwerkende wielen hebben natuurlijk dezelfde steek = t. Zijn beide wielen uit hetzelfde materiaal gemaakt dan zijn de tand-dikten c meestal gelijk, evenals de kuilwijdte d.
Men maakt de speling in tangentiële richting van circa 2/40 van de steek t dan wordt de tanddikte c en de kuilwijdte d op de steekcirkel:

$$c = \frac{19}{40}\ t\ [\mathrm{mm}]\ \mathrm{en}\ d = \frac{21}{40}\ t\ [\mathrm{mm}]$$

Bij houten tanden, die met gegoten ijzeren tanden samenwerken, wat vaak het geval is, laat men een geringere speling toe, namelijk van circa 1/40 van de steek t en maakt men de tanddikte en de kuilwijdte op de steekcirkel voor de houten tanden:

$$c = \frac{23}{40}\ t\ [\mathrm{mm}]\ \mathrm{en}\ d = \frac{17}{40}\ t\ [\mathrm{mm}]$$

De tanddikte en de kuilwijdte voor de dunnere gietijzeren tanden die met de houten tanden samenwerken bedragen dan:

$$c = \frac{16}{40}\ t\ [\mathrm{mm}]\ \mathrm{en}\ d = \frac{24}{40}\ t\ [\mathrm{mm}]$$

Hier zien we dat vanwege de sterkte de houten tanden ongeveer 44% dikker worden gehouden dan de samenwerkende gietijzeren tanden.

Bewerkte tanden
Praktisch gezien komen voor bewerkte tanden slechts evolvente-profielen in aanmerking, omdat alleen deze op eenvoudige wijze gemaakt kunnen worden. In Nederland worden bij de fabricage van machinaal bewerkte tandwielen de volgende afmetingen gehanteerd.

Kophoogte	a	a = m
Voethoogte	e	e = (1,15…1,2) . m, gemiddeld 1⅙ x m
Tandhoogte	h	h = e + a = 2⅙ x m

Voor een wiel met 60 tanden, m = 8 mm, wordt dan de kophoogte 8 mm, de voethoogte 1⅙ x 8 = 9,3 mm, en de tandhoogte of de tandkuil-diepte 2⅙ x 8 = 17,3 mm.
De steekdiameter van dit wiel = 60 x 8 = 480 mm, de voetcirkeldiameter 480 – (2 . 9,3) = 461,4 en de kopcirkeldiameter 480 + (2 . 8) = 496 mm.

Transmissiecijfer
Het transmissie cijfer i (overbrengingsverhouding of drijfwerkverhouding) is beperkt doordat anders de wielen een te grote middellijn krijgen. Bij een enkele overbrenging kan men gaan tot een i ≈ 25. Bij een dubbele overbrenging in een tandwielkast gaat men niet verder dan i ≤ 5…8 per overbrenging. Boven i ≈ 10 wordt splitsing in twee enkele overbrengingen goedkoper.
Bij stoomgemalen zien we in de regel voor de relatief langzaam draaiende (oude) opvoerwerktuigen zoals een scheprad of vijzel een dubbele overbrenging toegepast. Drijft de stoommachine een

stromingspomp aan, bijvoorbeeld een centrifugaalpomp , dan is deze meestal direct hieraan gekoppeld.
Voor niet bewerkte tanden en voor minder nauwkeurig gesneden tanden, zoals ze bijvoorbeeld met alleen een profielfrees of steekbeitel op de steekbank ontstaan, moet voor het goed inlopen het transmissiecijfer een geheel getal of een eenvoudige breuk zijn.

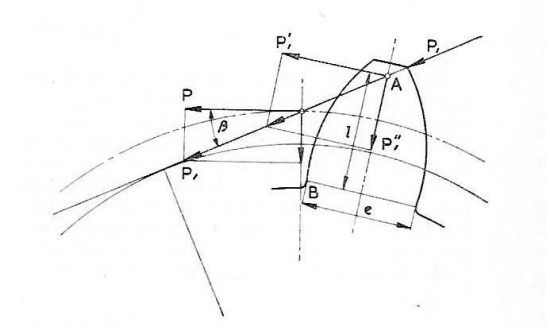
Bijvoorbeeld:

$$i = \frac{2}{1}\,;\ \frac{3}{1}\,;\ \frac{4}{1}\,;\ \frac{3}{2}\,;\ \frac{5}{2}\,;\ \frac{7}{2}\ \text{enz.}$$

Overbrengingen als bijvoorbeeld 20 op 99 tanden worden gebruikt bij periodieke veranderlijkheid van de tanddruk, om een gelijkmatige slijtage van het rondsel te bewerkstelligen. Een voorbeeld hiervan is de aandrijving van een plunjerpomp.

Tandbelasting

Voor de berekening van de tandwielen gaat men uit van de omtrekkracht P kg op de steekcirkel. Deze kracht is af te leiden uit het koppel dat het wiel moet overbrengen.



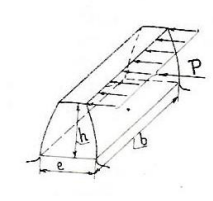
$$M = P.r\ [\text{kgcm}]$$

Als het over te brengen vermogen N pk en het aantal omwentelingen per minuut n gegeven zijn dan vindt men de omtrekskracht uit:

$$P.r = 71620\,.\frac{N}{n}\ [\text{kgcm}]$$

Tandkrachten

De omtrekkracht P belast de tand zo dat hij gebogen wordt en de tandflanken worden ingedrukt. De buigspanning in de voet van de tand zal het grootst zijn wanneer de top van het tegenwerkende profiel in ingrijping is, waarbij we aannemen dat slechts één tand de gehele tand-druk moet opnemen.



Laten we de kracht P aangrijpen in punt A van de tand dan kan deze ontbonden worden in P_1', loodrecht op de hartlijn en P_1'' er langs. De kracht P_1' veroorzaakt hier een buigend moment met l als arm. De kracht P_1'' veroorzaakt een gelijk- matig over de voet verdeelde drukspanning.

Tand op buiging belast

Uit de sterkteleer weten we dat het weerstandsmoment tegen buiging van een rechthoekige doorsnede met een hoogte e en een breedte b is:

$$I = \frac{1}{6} . e^2 . \ b \ [cm^3]$$

Er heerst in die tandvoet een buigspanning:

$$\sigma_b = \frac{P_1' . l}{\frac{1}{6} . e^2 . \ b} \ [kg/cm^2]$$

En een drukspanning:

$$\sigma_d = \frac{P_1''}{e . \ b} \ [kg/cm^2]$$

De grootste totale spanning die in de tand optreedt, is een drukspanning bij de tandvoet in B en bestaat uit:

$$\sigma_{d\,max} = \ \sigma_b + \ \sigma_d \ [kg/cm^2]$$

De grootste trekspanning die ontstaat is:

$$\sigma_{t\,max} = \ \sigma_b - \ \sigma_d \ [kg/cm^2]$$

De afrondingen bij de voet van een tand zijn dus zeer wenselijk om de kerfwerking te verminderen. De waarden e en l van de tand zijn evenredig met de steek t. Zij hangen uiteindelijk af van het aantal tanden, het gebruikte moduul en natuurlijk van de omtrekkracht P.
Teneinde een benaderde waarde te vinden voor de spanning in de tanden gebruiken we de hier voor gegeven figuur met de omtrekkracht P aangrijpend in de top van de tand, loodrecht op de hartlijn ervan.
Met een gemiddelde waarde voor h ≈ 0,7 . t en e ≈ 0,55 . t wordt de buigspanning in de tand:

$$\sigma_b = \frac{P . h}{\frac{1}{6} . e^2 . \ b} = \frac{P . 0{,}7\, t . 6}{0{,}55^2 . \ t^2 . b} = \frac{14 . P}{b . t} \ [kg/cm^2]$$

Of de omtrekkracht:

$$P = \frac{\sigma_b}{14} . b . t \ [kg]$$

Omdat de spanningen gedurende het bedrijf telkens van nul tot maximum aangroeien kan men slechts een deel van de beproefde spanning van het voor het tandwiel toe te passen materiaal gebruiken. In onderstaande tabel wordt hiervan een overzicht gegeven. Hier bovenop worden er bij het berekenen van de sterkte van de tanden van het wiel nog een aantal veiligheidsfactoren in acht genomen die voornamelijk te maken hebben met het soort bedrijf, de belasting en de bewerking

van de tanden. Het verminderen van de toelaatbare spanning heeft ook tot doel dat de tanden minder snel slijten.

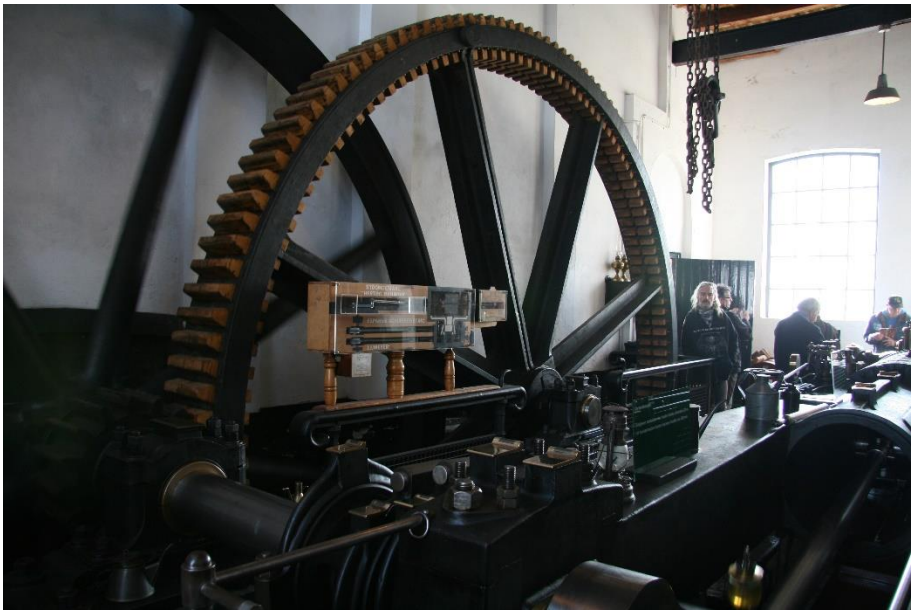
Materiaal:	$\bar{\sigma}$ kg/cm²:	$\frac{\bar{\sigma}}{14}$ kg/cm²;
gietijzer Gij. 18	400	28
„ Gij. 22	490	34
gietstaal Stg. 52	900	60
fosforbrons	750	50
vloeistaal St. 50	1000	70
„ St. 60	1100	85
„ St. 70	1400	100
gelegeerd (Si-Mn) staal .	1400...1800	100...130
„ , a. d. oppervlakte gehard staal	1000...2200	70...150
wit- of hagebeukenhout .	200	14
ruwe-huid, kunsthars enz.	300...400*)	

Toelaatbare materiaalspanningen tandwielen

Uit bovenstaande tabel voor de toelaatbare materiaalspanning voor het tandmateriaal van tandwielen kan worden afgeleid dat de minste soort gietijzer nog steeds twee keer sterker is dan het beukenhout waar de tanden of kammen van de kamwielen van worden gemaakt. Door toepassing van gelegeerde staalsoorten en oppervlakte harding alsmede het naslijpen van de tandprofielen zijn tegenwoordig nog hogere belastingen toegestaan dan hier boven in de tabel worden aangegeven.

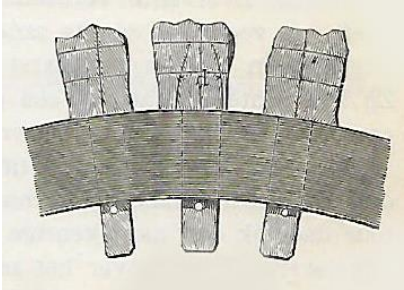
Materiaal en constructie van de tandenwielen

Wielen voor de overbrenging van kracht en snelheden bij gemalen werden in het verleden vaak samengesteld uit gietijzeren rondsels die samen liepen met meestal gietijzeren wielen met houten tanden. Soms, overgenomen uit de molenbouw, was het wiel ook van hout. De spaken van deze wielen zij nagenoeg plat omdat ze tussen de uitstekende pennen van de tanden moeten passen. De tanden bij brede wielen maakt men soms uit twee delen. De ruwe vorm van de tand moet tenminste 20…25 % groter zijn dan die van de uiteindelijk afgewerkte tand. De reden daarvoor is dat de vierkante gaten in de gietijzeren tandkrans waarin de houten tanden bevestigd worden niet altijd nauwkeurig gegoten zijn en de hartlijn hiervan niet nauwkeurig overeen komt met die van de op de steek te plaatsen houten tanden, ergo de tandvorm buiten het ruw gevormde hout valt.
Is men genoodzaakt vers hout te verwerken, dan dienen de ruw besneden stukken vier tot vijf uur in kokend water gelegd te worden. Dit water dient men een aantal keren te verversen om de extractiestoffen die het hout doen krimpen en bederven te verwijderen. De aldus uitgeloogde houtblokken worden vervolgens enige weken op een warme en droge plaats gelegd voor ze verder kunnen worden bewerkt. De tanden zijn van dezelfde kwaliteit als langdurig natuurlijk gedroogd hout.



Voorbeeld van tandwiel met houten tanden (Gemaal Hertog Reijnout)

Wanneer de tanden of kammen niet goed droog zijn of maar juist in de openingen van de tandkrans passen raken ze los. Een lapmiddel is dan de tanden er uit te nemen en de ruimte met schrijfpapier of dun karton op te vullen bij het opnieuw indrijven. Bij het indrijven moet men waken voor het springen van de gietijzeren krans. Wanneer alle kammen zijn aangebracht, worden de steekcirkel en de topcirkel erop afgetekend door het rad te draaien langs een vast punt. Vervolgens wordt de steekcirkel verdeeld en wordt aan beide zijden de tandvorm afgetekend. De leverancier van het rad dient hiervoor een tekening en een plaatstalen mal te leveren. De mal omvat minstens drie kammen en wordt bij het aftekenen steeds een kam opgeschoven om er zeker van te zijn dat de steek steeds klopt. Nadat de flanken ten ruwste zijn bewerkt en de pennen voor het vasthouden van de kammen in de krans zijn afgetekend worden de kammen eruit geslagen, genummerd en vervolgens afgewerkt.



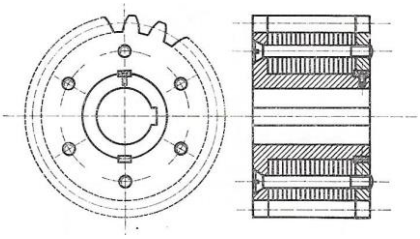
Ruw bewerkte houten tanden

Na het afwerken en voordat ze weer worden aangebracht en geborgd worden de kammen tegen vochtinwerking verduurzaamd. Een geschikt middel om de kammen te verduurzamen is ze in hete lijnolie te leggen tot ze hiermee verzadigd zijn. De tanden worden gesmeerd met bijenwas, lijnolie of grafiet. De tanden hebben een evolvente vorm.

Geheel uit metaal vervaardigde wielen voor kleine krachten en snelheden worden gemaakt van gegoten ijzer. Dit is goedkoop, gemakkelijk te maken en heeft goede loopeigenschappen in combinatie met rondsels van staal of brons. Voor het overbrengen van grote krachten en snelheden past men gietstalen wielen toe of wielen uit al dan niet gelegeerd staal. Worden stalen wielen groter dan ongeveer 400 mm dan wordt de velg waarin de tanden zijn gesneden op een gietijzeren wiellichaam gekrompen.

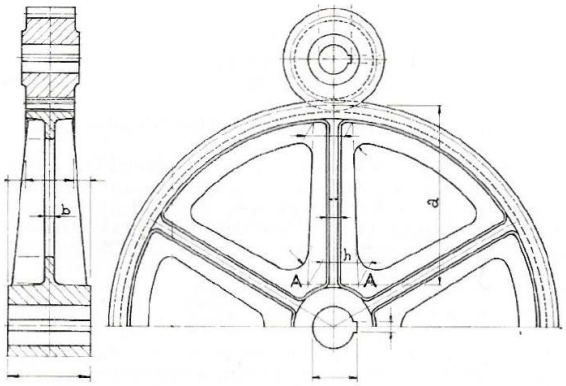
Dergelijke wielen met nauwkeurig bewerkte tanden moeten goed gesmeerd worden en zijn daarom in een kast ondergebracht. Rondsels moeten altijd van een beter materiaal zijn dan de wielen waarmee ze samenwerken omdat deze door het grotere aantal aangrijpingen per tijdseenheid meer slijten. Bronzen rondsels voldoen in dit opzicht zeer goed.

Om geluidloze overbrengingen te maken past men soms rondsels toe die gemaakt zijn uit geluiddempende materialen. Zij bestaan uit katoenweefsel, geïmpregneerd met synthetische hars en onder druk samengeperst.

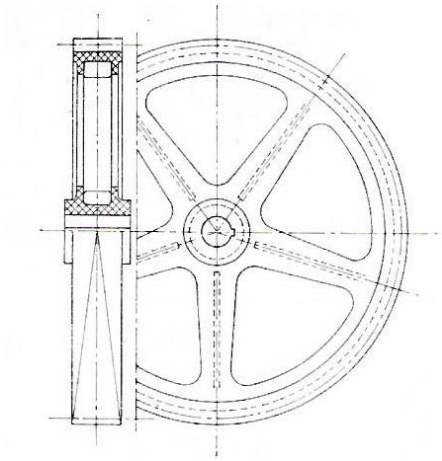


Rondsel uit geluiddempend materiaal

Gegoten wielen hebben spaken of zijn schijfvormig. De velling heeft ten minste een dikte s = 1,7 . m mm. Bij spaakwielen wordt de velg versterkt door een of twee ruggen, ieder ongeveer 2 . m. mm dik. De asdikte, dat is de boring d_b van de wielnaaf, wordt bepaald door de omstandigheden, zoals bijvoorbeeld een sterk wisselende belasting, van de krachtoverbrenging. De naaflengte neemt men l = (1,5…2) . d_b mm. De naaf- middellijn voor gegoten ijzer d_n = 1,8 d_b + 15 mm.



Wiel met kruisvormige spaken



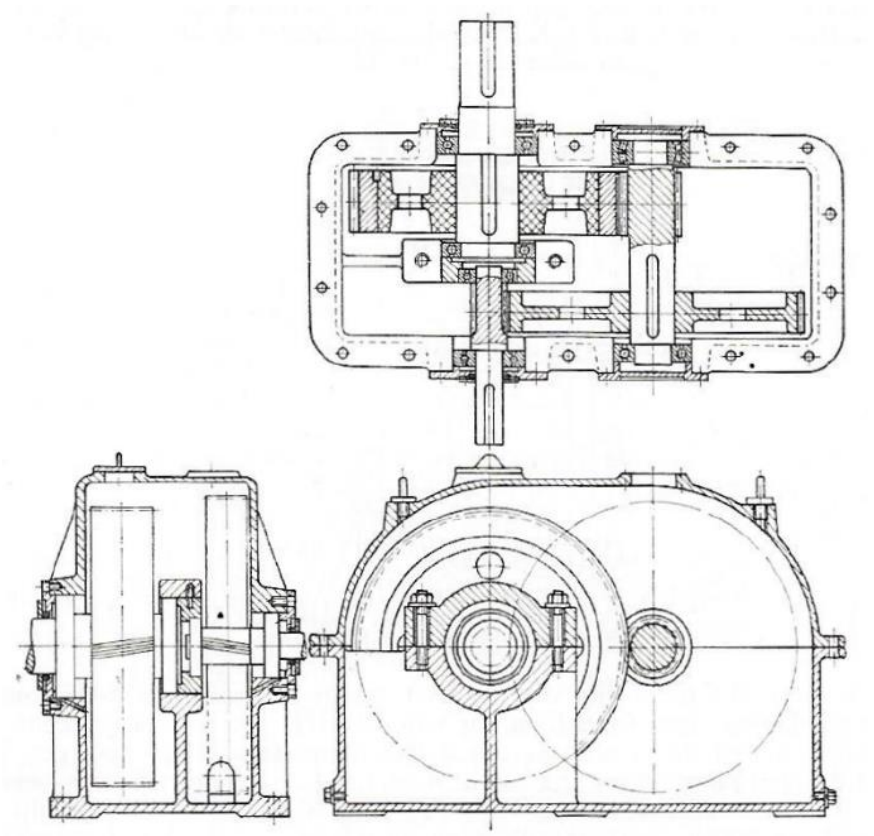
Wiel met H-vormige spaken

Grote wielen worden met behulp van een inleg- of kopspie met de as verbonden. Om het wiel gemakkelijk te kunnen monteren wordt de as ter plaatse van de verbinding dikker gehouden.

Spaken of armen van grote wielen hebben een kruis- of T- vormige doorsnede. Voor brede wielen is de H-vormige doorsnede in gebruik.

De wielen zijn meestal open opgesteld en worden alleen tegen aanraking afgeschermd. De tanden van de wielen worden meestal met een grafiet vetsoort gesmeerd dat tijdens bedrijf op de afgaande kant met een kwast (bokkenpoot) wordt aangebracht.

Op de volgende bladzijde staat een tandwielkast afgebeeld met een tweetraps overbrenging. Hierbij is het gegoten grote wiel op de uitgaande as voorzien van een opgekrompen velg. De tanden in het eveneens gegoten grote wiel van de eerste trap zijn zonder tussenkomst van een aparte velg direct in het materiaal gesneden. Omdat het rondsel een gering aantal tanden heeft zijn deze direct in de naaf dan wel het as- materiaal gefreesd. De wielen en het rondsel zijn schuin vertand. De schuinte van de tanden is tegengesteld waardoor de hierdoor veroorzaakte axiaal krachten elkaar opheffen en de lagers niet extra belasten.
De getoonde kast wordt tot een bepaald niveau met smeerolie gevuld. De wielen die door dit oliebad draaien zorgen voor de toevoer van de olie naar de tanden bij het ingrijp-punt van de wielen en de wentellagers. We noemen dit spatsmering.

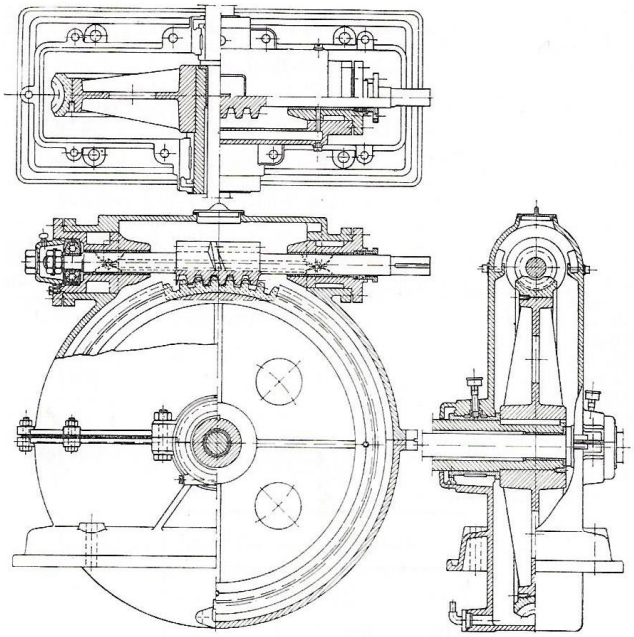


Co-axiale tandwielkast

Soms zijn daartoe gootjes aangebracht om er zeker van te zijn dat alle onderdelen van voldoende olie worden voorzien. Indien de kasten op een hellend vlak worden opgesteld wordt druksmering toegepast of men voorziet de lagers van vetnippels.

Bij druksmering wordt meestal, aan de ingaande as, een tandwielpompje gekoppeld dat de olie uit de kast zuigt en met vertakte leidingen naar de verschillende te smeren onderdelen voert. Boven elke tandwieloverbrenging wordt dan een sproeibuis aangebracht, die de olie over de breedte van het wiel verdeelt. Een deel van de over te brengen energie wordt als gevolg van onvermijdelijke wrijving in warmte omgezet. Als deze warmte niet of onvoldoende via de kast naar de omgeving kan worden afgevoerd moet de smeerolie gekoeld worden. Veelal wordt hiertoe bij gemalen een roodkoperen koelspiraal in de tandwielkast aangebracht en wordt een klein deel van het verpompte polderwater gebruikt als koelmedium. In geval van druksmering paste men met het zelfde doel ook wel pijpenkoelers toe.

Hier onder staat een worm-wormwielkast afgebeeld. In het algemeen dient een wormoverbrenging tot het verlagen van het toerental maar nog meer om met een kleine kracht een groot koppel te kunnen ontwikkelen zoals bijvoorbeeld bij een torninrichting van een stoommachine, het bewegen van de zware rookschuiven bij een stoomketel of bij een eenvoudige handtakel. De wormen worden in de regel van staal gemaakt, en soms aan de oppervlakte gehard en geslepen. Het wormwiel heeft meestal een spakenkruis of binnenschijf van gegoten ijzer of -staal en een wormkrans van fosfor- of aluminium-brons. De overbrenging wordt meestal gemonteerd in een gesloten gietijzeren kast. De wormen worden uitgevoerd met één-, twee- en drievoudige spoed. Afhankelijk van de spoed en het aantal gangen is de overbrenging zelf remmend wat vooral voor overbrengingen die worden toegepast bij verstelinrichtingen of takels belangrijk is. De gesloten wormkast wordt tot een bepaald niveau gevuld met smeerolie of een dun soort smeervet. Het rendement van dit soort overbrengingen is relatief laag waardoor er vooral bij continu bedrijf veel warmte wordt ontwikkeld en de kast gekoeld moet worden. Vaak wordt daartoe de kast aan de buitenkant van koelribben voorzien en de sneldraaiende wormas van een ventilator.



Worm-wormwielkast