

Rapport berekening molenroede, een verificatie van uitgangspunten.

L. Drost

1 Inhoudsopgave

1	Inhoudsopgave	2
2	Inleiding	3
3	Bestuderen van rapporten	4
3.1	Rapport Berekening molenroede 1983	4
3.2	Richtlijnen voor de vervaardiging van stalen molenroeden - 1985	5
3.3	Richtlijnen voor het vervaardigen van stalen molenroeden - dec 2011	6
3.4	Positiefouten in tabel flensafmetingen in Fig. 8.16.....	12
3.5	Verloop van weerstandsmomenten als functie van de vlucht.....	14
4	Reactie op aanvullende rapporten	16
5	Berekening prestatie curven	18
6	Berekening rotorbelastingen.....	21
6.1	Definitie assenstelsel	21
6.2	Kleine molen minimale middenzwaarte.....	21
6.3	Flens minimale middenzwaarte vlucht 22 m	23
6.4	Berekening vermoeïingsbelasting 22m molen	27
6.5	Kleine molen maximale middenzwaarte	28
6.6	Flens maximale middenzwaarte vlucht 22 m	29
6.7	Grote molen maximale middenzwaarte.....	33
6.8	Flens maximale middenzwaarte vlucht 29 m.....	34
7	Technische conclusies	37
8	Technische aanbevelingen	37
9	Organisatorische aanbevelingen	38
10	Referentielijst	40
11	Bijlage Berekening vangkoppel in een wiek en in de as.....	41
12	Bijlage Profieleigenschappen	43
13	Bijlage Flensafmetingen	44
14	Bijlage Overlapverbinding	46
15	Bijlage Partiële factoren IEC 61400 Windturbijnenorm	49
16	Bijlage Rekenblad plaatschema richtlijnen 1985 en 2011.....	51
17	Eindconclusie "Schema plaatdiktes richtlijn 1985 en 2011"	55

Figuur 1	Coördinaten van de hoekbout in y – richting van de minimale middenzwaarte als functie van de vlucht (horizontale as m, verticale as mm).....	13
Figuur 2	Coördinaten van de hoekbout in y – richting van de maximale middenzwaarte als functie van de vlucht (horizontale as m, verticale as mm).....	14
Figuur 3	W_{yy}/D^3 (moment axiale belasting) van de middenzwaartes als functie van de vlucht.	15
Figuur 4	W_{xx}/D^3 (moment tangentiële belasting) van de middenzwaartes als functie van de vlucht (vertikale as dimensieloos).....	15
Figuur 5	Dimensieloze performance curven van een rotor met profielen volgens lijn a.....	18
Figuur 6	Dimensieloze rotorthrust van een rotor met profielen volgens lijn a.....	18
Figuur 7	Dimensieloze performance curven van een rotor met profielen volgens lijn c.....	20
Figuur 8	Dimensieloze rotorthrust van een rotor met profielen volgens lijn a.....	20
Figuur 9	Definitie coördinatensysteem in de wiek.....	21

	Rapport berekening molenroede, een verificatie van uitgangspunten.	pagina 3 van 57
--	--	-----------------

Figuur 10 Verloop coördinaten midden wand en wanddikte rondom de roede (horizontaal omtrekscoördinaat mm, vertikaal afmeting mm).....	24
Figuur 11 Verloop wandspanning (Mpa) $t_{gv}M_{xx}$, M_{yy} en F_z in de wand van de roede ($g_F=1$).....	24
Figuur 12 Verloop van de lijnbelastingen L (N/mm) midden op de wand ($g_F=1$).....	25
Figuur 13 Verloop van wandkrachten op 4 hoeken in N ($g_F=1.1$).....	25
Figuur 14 Verloop van boutspanning in MPa en krachten in kN als functie van de wandkracht Z	27
Figuur 15 Faaltoestand bij te dunne flens	31
Figuur 16 Faaltoestand bij te dunne flens	36
Figuur 17 Berekening geval remmen bij 13 m/s met vangkoppel volgens berekening in tabel 18.....	41
Figuur 18 Berekening geval remmen bij 9 m/s met vangkoppel als in fig. 14.	42
Figuur 19 Schets van overlapverbinding met korte en lange roede	49
Figuur 20 Voorbeeld verloop roedezwaarten maximale middenzwaarten richtlijn 1985	51
Figuur 21 Invoer constanten en belastinggeval en globale uitvoergrootheden	52
Figuur 22 Momentenlijnen axiale en tangentiële aërodynamische belasting bij 13 m/s 100 einden. .	53
Figuur 23 Momentenlijnen axiale en tangentiële totale belasting bij 13 m/s 100 einden.	54

2 Inleiding

Voor monumentale windmolens heeft de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed in 2011 een richtlijn uitgegeven voor het vervaardigen van stalen molenroeden. Om een minimale levensduur van 50 jaar te bereiken bestaat er de mogelijkheid tot het aanbrengen van een flensdeling in het midden van de roede om het verzinken van roeden van 15 meter en langer mogelijk te maken. Door problemen met een aantal deelbare roeden met een flensverbinding, is er behoefte aan een dubbelcheck van de uitgangspunten die de basis vormen voor de richtlijn. Dit is in aanvulling op de Design verification van Stemar Engineering uit 2016. . In dit rapport wordt de volgende verificatie uitgevoerd:

1	Bestuderen van de rapporten in ref. 1 t/m 3 op juistheid van uitgangspunten, zoals het actueel zijn van gebruikte normen, gebruik van belastingfactoren, trillingsfactoren, aërodynamische principes en uitgangspunten. Om dit zo goed mogelijk te doen zal contact opgenomen worden met een of meer auteurs van ref. 1 - 3 en zal gebruik gemaakt worden van bibliotheek Min. v. Ce./TUD, etc.
2	Een handmatige analyse van de afmetingen en het belastingpatroon van de flensverbinding, uitgaande van de juistheid van de in ref. 1 berekende belastingen. Deze analyse zal rekening houden met het niet cirkelvormig zijn van de opstelling van de boutkrans.
3	Definitie invoer voor berekeningen met Phatas
4	Het maken van performance curves met Phatas IV, een rekenprogramma volgens ref. 4. Om dit zo goed mogelijk te doen wordt contact opgenomen met de makers van dit programma. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de gegevens die in ref. 1 gebruikt zijn.
5	Evaluatie van de resultaten van 3. Er wordt gelet op het actueel zijn van de gegevens uit het Prinsenmolenboek. Te denken valt aan eventueel benodigde correcties van lift-weerstand gegevens die gemeten zijn op een schaalmodel. Om dit zo goed mogelijk te doen wordt literatuur geraadpleegd en wordt contact opgenomen met specialisten op dit gebied van de TU Delft.

3 Bestuderen van rapporten

3.1 Rapport Berekening molenroede 1983

Dit rapport ref. (1) vormt de basis van de 2 jaar later gepubliceerde richtlijn. Het geeft een fraai historisch overzicht waarin verschillende constructievormen (hout, geklonken, gelast) en hun verspreiding en toepassing worden toegelicht. Er wordt daarin ingegaan op verschillen tussen de staalsoorten waaruit de geklonken roeden en de gelaste roeden gemaakt zijn. De gelaste zijn meer corrosiegevoelig wegens het hogere koolstofpercentage. Het inwendige van de roeden is na het in elkaar lassen niet meer bereikbaar voor een grondige corrosiebescherming. Tectyleren werd wel gedaan maar was niet afdoende voor een langdurige bescherming.

Verder wordt literatuuronderzoek beschreven waarin het onderzoek aan de Prinsenmolen uitgebreid behandeld wordt. Op deze molen bij Hillegersberg zijn uitgebreide proefnemingen gedaan teneinde het rendement te verhogen zonder het bestaande oud-hollandse karakter te veranderen. Er zijn veel verschillende profielen uitgetoetst die het gedrag verbeterden. Op de Prinsenmolen te Hilligersberg, waar door de TUD in 1933 uitgebreide onderzoeken gedaan zijn is bijv. een verbeterd profiel toegepast. Toen de molen van nieuwe gelaste roeden voorzien werd is echter bij de vervanging het profiel in oud-hollandse staat teruggebracht, misschien omdat aanzien toen belangrijker geacht werd dan prestatie. De overige hoofdstukken betreffen de berekening van verschillende typen roeden. Tussen de regels door staat ook hierin nog veel informatie over in de praktijk voorkomende wiefafmetingen en wiefvormen. Daarin wordt een vlucht van 22 m een kleine vlucht genoemd en wordt opgemerkt dat daarvoor bij deze molens het gewicht van de roeden meer bepaald wordt door praktische eisen t.a.v. de uitvoering (minimale plaatdikte en middenzwaarte, dus de dimensionering van het in de askop zittende deel). Voor deze molens kan de omhullende liftcurve gebruikt worden (=lijn c). Deze geeft een hogere lift die bij grotere molens zou leiden tot extreem zware roeden. Daarom wordt het volgende aangehouden voor de berekening:

Lijn a	Bij molens met oud hollands profiel
Lijn b	Bij molens met stroomlijnprofiel
Lijn c	Bij overige molens
Eigen inzichten voor lift en roedgegevens	Andere wiefvormen dan oud-hollandse

Tabel 1 Keuzeschema voor profielgegevens

Bij het doorlopen van het rapport zijn er enige tekortkomingen gebleken. De volgende punten verdienen aandacht:

1. Er is geen rekening gehouden met axiale inductie volgens de impulswet. Dit veroorzaakt een overschatting van de axiale en tangentiële windbelastingen. Met moderne rekenprogramma's zoals FOCUS (WMC), FAST (NREL), HAWC (RISOE, DTU) kan hierin voorzien worden.
2. Evenzo is het een éénpuntsberekening, de meest ongunstige wiefstand is bepalend (vertikaal voor axiale wind + massa belasting, horizontaal voor tangentiële wind + massabelasting). De dynamische belasting kan daardoor geen schaduw effect van de romp in rekening brengen. Dat veroorzaakt een onderschatting. Aangeraden wordt een vermoëningsspectrum te maken met berekening van momenten als functie van t in een aantal belastinggevallen bij variërende windsnelheden. De belastinggevallen beschrijven de verschillen voortkomend uit

	Rapport berekening molenroede, een verificatie van uitgangspunten.	pagina 5 van 57
--	--	-----------------

mogelijke wind en gebruiksomstandigheden. Ook hierin voorzien de onder 1 genoemde rekenprogramma's.

3. Het vangkoppel is fout berekend. Het massa draagheidsmoment van één wiek is niet gelijk aan $m \cdot r_z^2$, (zie p. 32) maar gelijk aan $\int r_i^2 \cdot dm_i$. In Bijlage Berekening vangkoppel in een wiek en in de as is een correcte berekening opgenomen.
4. Het vangkoppel op de as is de som van de bijdragen van de 4 wieken. Er is bij de controleberekening van de torsiespanning in de as gebruik gemaakt van het moment van slechts één enkele wiek. Zie bijlage voor de correcte waarde.

3.2 Richtlijnen voor de vervaardiging van stalen molenroeden - 1985

Deze in 1985 uitgebrachte richtlijn van de Rijksdienst voor de Monumentenzorg te Zeist (zie Referentielijst) is het resultaat van de berekeningen in 1. Het geeft aanwijzingen voor de fabricage van gelaste stalen roeden uit één stuk (zonder flensverbinding in het midden).

Er wordt een algemeen deel (Deel I) gegeven, waarin op de historie wordt ingegaan. Bij de overgang van geklonken roeden (zg. Potroeden, naar de naam van de fabrikant) naar gelast wordt opgemerkt dat de roeden vaak dienden te werken op molens die onder de Monumentenwet vallen. Om deze reden heeft de toenmalige Rijksdienst voor de Monumentenzorg een opdracht gegeven tot onderzoek aan ingenieursbureau Wassenaar BV. Te Haren (Gr.). Bureau Wassenaar heeft het belastingspectrum geanalyseerd aan de hand waarvan een berekeningsmodel is opgesteld. Tevens was in de opdracht begrepen het uitwerken van plaatdikteschema's (Deel IV). Deze richtlijn voorziet daarin alsmede in adviezen t.a.v. de uitvoering, zoals eisen te stellen aan dimensionering, laskwaliteit, conservering etc. Met name dit deel (Deel II en Deel III) is zeer uitgebreid en gedetailleerd en van grote waarde voor de fabrikant en de klant. De richtlijn kan door betrokken bedrijven gebruikt worden en er kan in bestekken etc. aan gerefereerd worden.

Het plaatdikteschema is ingedeeld in twee tabellen, een voor minimale en een voor maximale middenzwaarte. Die voor de maximale heeft twee vluchtgroottes (28 en 29 m) meer dan de minimale.

Behalve de in 3.1 genoemde kanttekeningen die ook voor deze richtlijn gelden zijn er geen andere opmerkingen dan dat de hiermee berekende molenroeden i.h.a. goed voldoen maar dat corrosieaspecten meer aandacht verdienen (zie 3.3).

Opmerking: Bij de discussie rond het intrekken van de richtlijn 2011 (ref. 3) (zie vervolg) ontstond behoefte aan een exacte weergave van de werkelijke extreme belasting die een roede volgens ref. 1 kan hebben. Deze belasting zou dan, omdat de richtlijn een betrouwbare roede levert, als uitgangspunt genomen kunnen worden bij toetsing van maatregelen te nemen voor reparatie van ondeugdelijke roeden. Voor dat doel is een Excel rekenblad gemaakt waarmee zo goed mogelijk de berekeningen volgens de beschrijving in ref. 1 uitgevoerd kunnen worden. Het rekenblad wordt beschreven en er worden resultaten getoond in Bijlage Rekenblad plaatschema richtlijnen 1985 en 2011. De richtlijn 1985 en de richtlijn 2011 Type A veronderstellen in het midden een doorgaande plaat terwijl er op die plaats in het rekenblad een laslocatie zit. De lasberekening op deze locatie kan bijv. gebruikt worden als er twee halve roeden aan elkaar gelast worden tbv. reparatie.

	Rapport berekening molenroede, een verificatie van uitgangspunten.	pagina 6 van 57
--	--	-----------------

3.3 Richtlijnen voor het vervaardigen van stalen molenroeden - dec 2011

Deze richtlijn (ref. 3) is een vervolg op de in 1985 uitgebrachte richtlijn. Volgens het gestelde in 1.2 van de richtlijn bleken de stalen roeden, hoewel sterk genoeg qua ontwerp, in de praktijk vaak te snel te corroderen, waardoor deze voortijdig vervangen moeten worden. Ik citeer:

Het streven bij de molenroeden volgens het nieuwe voorschrift is een minimale levensduur van 50 jaren, zodat de roeden tweemaal zolang meegaan als de hekwerken. De hekwerken worden namelijk om de 25 jaren vervangen. Na 25 jaar zullen de roeden opnieuw volledig gecoat moeten worden, omdat er geen coatingsysteem is dat langer meegaat dan 25 jaar.

Om tot het nieuwe voorschrift te komen is een literatuuronderzoek uitgevoerd en is een nieuw ontwerp doorgerekend met behulp van een eindige-elementenmodel.

Bij deze richtlijn horen een drietal digitale bijlagen, t.w.:

- Bijlage A en B: microsoft Excel rekenblad
 - Bijlage C: 4 werktekeningen in PDF en DWG-formaat (AutoCAD)
- Bij deze richtlijn hoort tevens een spreadsheet-programma (zie Bijlage B), waarmee de benodigde plaatindeling kan worden bepaald. Bij vervanging van roeden is het aanbevelingswaardig om het formulier volgens Bijlage A in te dienen bij het bevoegd gezag.

De belangrijkste wijzigingen van de nieuwe richtlijn zijn:

- Toepassen van weervast staal of verzinkt constructiestaal om de corrosieweerstand te vergroten en
- Mogelijkheid tot het aanbrengen van een flensdeling in het midden van de roede om het verzinken van roeden van 15 meter en langer mogelijk te maken.

Er is een succesvol pilot-project uitgevoerd met een deelbare roede van 24 meter met een flensdeling, welke thermisch is verzinkt.

Tot zover het citaat. Hierna wordt in hfdst. 2 een keuzeschema weergegeven waarmee de materiaalkeuze bepaald wordt: de traditionele roede (ongedeeld) uitgevoerd in weervast of verzinkt constructiestaal (aangeduid met type A) en de gedeelde roede (aangeduid met type B) die wegens de gereduceerde lengte thermisch verzinkt kan worden. De roeden volgens type A dienen periodiek opnieuw geconserveerd te worden en zijn inwendig met een lans getectyleerd. Het weervaste staal (Corten) kan in kuststreken niet toegepast worden omdat het niet tegen een zout milieu kan (overmatige roestvorming en daardoor mogelijk te grote verzwakking).

In hfdst. 3 wordt het onderwerp en toepassingsgebied omschreven. Eerder werd al aangegeven dat de hekwerken elke 25 jaar vervangen dienen te worden. Als verwachte levensduur van de roeden wordt minimaal 50 jaar genoemd.

In hfdst. 4 wordt een overzicht van gehanteerde normen ingedeeld naar onderwerp gegeven. De gebruiker dient zorg te dragen voor het gebruik van de laatste versies daarvan.

In hfdst. 5 is een lijst met termen en definities gegeven:

Termen en definities

As Zie wiekenas

Asrad/wiel Zie bovenwiel

Baljoening Zie biljoening

Biljoening Zeegvormige afschuining van de voorkant

Binnenroede De roede die het dichtst bij de molenkap door de wiekenas loopt

Buitenroede De roede die de binnenroede kruist en het verst van de molenkap af ligt

Heklatten De taps gezaagde houten latten die (ongeveer) haaks op de roede staan en zijn opgesloten in de hekgaten; ze worden onderling verbonden door evenwijdig aan de roede lopende zomen of zoomlatten en vormen samen daarmee het hekwerk, waarop het molenzeil kan worden uitgerold. Er zijn twee verschillende uitvoeringen:

- tapse heklatten die zonder wiggen worden vastgeslagen en
- rechte heklatten die met wiggen worden vastgeslagen

Het type heeft gevolgen voor heklattgaten in de roeden.

Jalouziezwichting Wieken uitgevoerd met jaloezieën i.p.v. zeilen zijn geschikt voor zelfzwichting.

Middenzwaarte De breedte en hoogte van de roede bij de asdoorgang.

Molenroede Houten of kokervormig stalen balken waar de heklatten in zijn bevestigd. De binnen- en buitenroede zijn vastgewigd in de askop en vormen samen met de complete tuigage het wiekenkruis

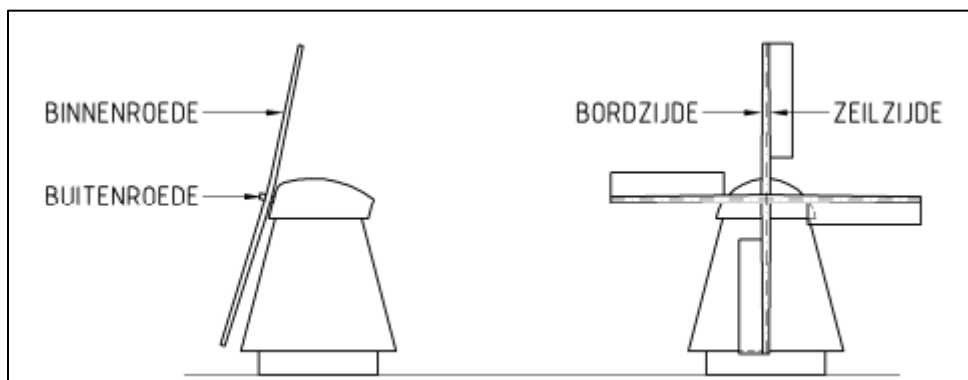
Porring De diepte van de bocht van de (binnen)roede

Slingerklamp De slinger- of zeilklampen worden gebruikt om het opgerolde zeil vast te zetten.

Vlucht De lengte van de roede

Zeeg De schuinite van de heklatten t.o.v. het maalvlak

Zeilkikker De op de voorzijde van de roede bevestigde haken (8 t/m 15 per end) t.b.v. de bevestiging van het molenzeil.



Figuur 5.1: Positie binnen- en buitenroeden

In hfdst. 6 volgt een symbolenlijst.

	Rapport berekening molenroede, een verificatie van uitgangspunten.	pagina 8 van 57
--	--	-----------------

Voor de afmetingen van de flensverbinding zijn daarvan de volgende symbolen van belang:

Doorsnede-maten

H hoogte middenzwaarte [mm]

B breedte middenzwaarte [mm]

h hoogte eindzwaarte [mm]

b breedte eindzwaarte [mm]

dn dikte plaatdeel [mm]

Middenzwaarte is de sterkte van de roede in het midden, ter plaatse van de deling. Deze is hier altijd rechthoekig en wordt uitgedrukt in breedte *B*, hoogte *H* en wanddikte *d*. Eindzwaarte is ter plaatse van het wiekeind (*hxb*).

In hfdst. 7 is een meer gedetailleerd advies bij de materiaalkeuze van het staal weergegeven. Daarbij is gelet op eigenschappen die het thermisch verzinken betreffen. Ook wordt de minimale sterkte voorgeschreven (S355).

Hfdst. 8 betreft constructieve details en daarvan specifiek 8.6 de deling.

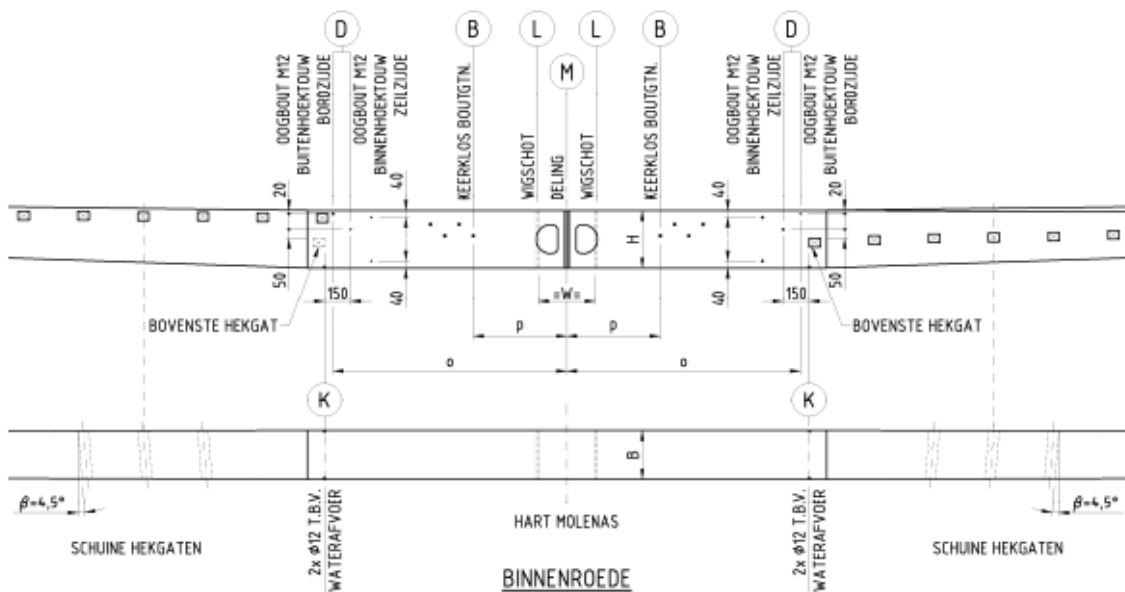
8.6. Flensdeling deelbare roede [TYPE B]

8.6.1. Inleiding

De enige afwijking van de TYPE B ten opzichte van TYPE A is de aanwezigheid van een flensdeling.

Deze deling dient bij voorkeur tijdens het samenstellen van de roede-delen te worden aangebracht. Als de deling achteraf wordt aangebracht bestaat er kans op onwenselijke vervormingen t.g.v het snijden en/of het lassen. De fabrikant is echter vrij om de volgorde te kiezen mits aan de tolerantie-eisen na levering voldaan wordt.

8.6.2. Positie flensdeling



Figuur 8.15: Positie flensdeling

De deling dient in het midden van de roede aangebracht te worden. Voor roeden met een zwicht-as mag de deling maximaal 100 mm excentrisch verschoven worden.

Opmerking bij de laatste zin: het is niet duidelijk of de lengte van de roedehelften daarvoor gecorrigeerd moet worden. Het lijkt verstandig dat wel te doen gezien de hiermee geïntroduceerde massaonbalans die moeilijker starten kan veroorzaken. Ook ontstaat er windonbalans die de molenkop enigzins assymmetrisch belast.

In het zijaanzicht van de binnenroede (Figuur 8.15 hierboven) is te zien dat het deel van de roede dat ingeklemd wordt in de askop recht is. De buigende momenten op de flensdeling zijn in theorie gelijk aan de momenten op de plaats waar de roede de askop verlaat. Omdat er rubber of ander meer of minder flexibel plaatmateriaal geadviseerd wordt als oplegging van de roede in de askop is het niet zeker dat de ondersteuning ter plaatse van het punt van uittreden als een zuivere scharnieroplegging gezien kan worden. Bij de berekening wordt in dit rapport daarom aangenomen dat deze momenten blijven toenemen tot aan de flensdeling. Dit geeft hoogstens een geringe overschatting.

Fig. 8.16 uit de richtlijn geeft een tabel en een aanzicht van een van de vele mogelijke flensafmetingen uit de tabel. Er is een indeling in twee groepen: een minimale en een maximale

middenzwaarte. Er wordt bij deze indeling geen verschil geconstateerd in het aantal bouten, in flensbreedte (altijd 60 mm) en in flensdikte (altijd 20 mm). Het onderscheid komt uit de BxH afmetingen en de wanddikte van de roede. Voor bijv. een 22m vlucht worden in beide gevallen dus evenveel bouten toegepast (18xM20). Voor de minimale zwaarte gebeurt dit in een rechthoek van $(330-2 \times 12) \times (280-2 \times 12) = 306 \times 256$ en voor de maximale zwaarte $(380-2 \times 8) \times (340-2 \times 8) = 364 \times 324$. Voor hetzelfde moment zijn daardoor niet alleen de trekkrachten die uit de roedewand komen hoger maar ook de boutkrachten bij de minimale zwaarte. Waarschijnlijk is het voor de wand geen probleem maar voor de bouten kan daardoor hetzelfde extreme geval meer problematisch zijn.

Flensafmeting van de stalen molenroede voor vlucht van 11 t/m 29 meter (traditionele roeden tot windkracht 4 met volle zeilen)

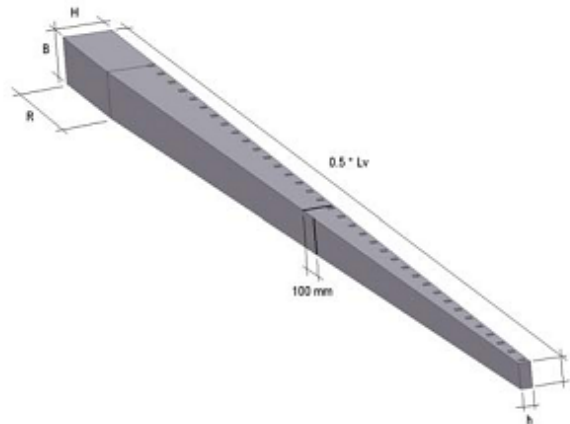
Vlucht [m]	Afmetingen									
	H [mm]	B [mm]	bouten d	aanhalen stuks	m [mm]	e1 [mm]	e2 [mm]			
Minimale middenzwaarte	11	190	150	M16	10	221	2	40	3	40
	12	200	160	M16	10	221	2	45	3	45
	13	240	180	M16	12	221	2	55	4	45
	14	250	190	M16	14	221	3	40	4	45
	15	260	200	M16	14	221	3	45	4	50
	16	280	230	M20	14	429	3	50	4	50
	17	290	250	M20	14	429	3	60	4	55
	18	300	260	M20	14	429	3	60	4	55
	19	310	260	M20	14	429	3	60	4	60
	20	320	270	M20	14	429	3	65	4	60
	21	320	280	M20	16	429	4	50	4	60
	22	330	280	M20	18	429	4	50	5	50
	23	340	280	M20	18	429	4	50	5	52
	24	350	280	M20	18	429	4	50	5	55
	25	350	300	M20	18	429	4	55	5	55
	26	360	320	M20	18	429	4	60	5	55
27	390	320	M20	18	429	4	60	5	60	
28	410	360	M20	22	429	5	55	6	55	
29	410	360	M20	22	429	5	55	6	55	
Maximale middenzwaarte	11	220	170	M16	10	221	2	45	3	45
	12	250	190	M16	10	221	2	50	3	50
	13	270	200	M16	12	221	2	60	4	50
	14	290	210	M16	14	221	3	45	4	50
	15	300	220	M16	14	221	3	50	4	55
	16	300	260	M20	14	429	3	55	4	55
	17	310	260	M20	14	429	3	65	4	60
	18	310	270	M20	14	429	3	65	4	60
	19	350	290	M20	14	429	3	65	4	65
	20	360	310	M20	14	429	3	70	4	65
	21	370	320	M20	16	429	4	55	4	65
	22	380	340	M20	18	429	4	55	5	55
	23	390	340	M20	18	429	4	55	5	57
	24	400	350	M20	18	429	4	55	5	60
	25	410	360	M20	18	429	4	60	5	60
	26	410	360	M20	18	429	4	65	5	60
27	410	360	M20	18	429	4	65	5	65	
28	410	360	M20	22	429	5	60	6	60	
29	410	360	M20	22	429	5	60	6	60	

Opmerkingen:
Afwijkende plaatindelingen vooraf melden bij Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed

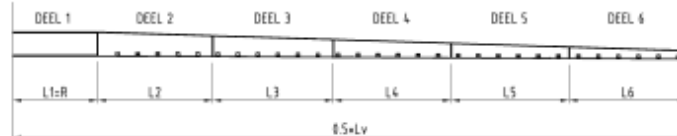
Tabel 1 Flensindelingen uit Bijlage B ref. 3.

Schema plaatdikten voor vlucht van 11 t/m 29 meter

Hoofdatmetingen roede



Nummering plaatdelen



Plaatindeling voor standaard middenzwaarte

	Afmetingen					deel 1		deel 2		deel 3		deel 4		deel 5		deel 6		deel 7		deel 8		Maza hele roe [kg]	
	Vlucht [m]	H [mm]	B [mm]	h [mm]	b [mm]	dikte [mm]	lengte [m]	dikte [mm]	lengte [m]	dikte [mm]	lengte [m]	dikte [mm]	lengte [m]	dikte [mm]	lengte [m]	dikte [mm]	lengte [m]	dikte [mm]	lengte [m]	dikte [mm]	lengte [m]		
Minimale middenzwaarte	11	190	150	80	150	8	1.0	4	4.5													230	
	12	200	160	80	160	8	1.0	4	5.0													260	
	13	230	180	80	160	8	1.0	4	5.5													310	
	14	250	190	80	160	8	1.0	4	6.0													350	
	15	260	200	80	170	8	1.0	6	1.0	4	5.5											410	
	16	280	230	80	170	8	1.0	6	1.0	4	6.0												470
	17	290	250	90	180	8	1.0	6	1.0	4	6.5												530
	18	300	260	90	180	8	1.0	6	1.8	4	6.2												590
	19	310	260	90	180	8	1.0	6	2.7	4	5.8												650
	20	320	270	90	180	10	1.0	8	1.0	6	2.4	4	5.6										780
21	320	280	90	190	10	1.0	8	1.7	6	2.8	4	5.0										870	
22	330	280	90	190	12	1.0	10	1.0	8	1.6	6	2.7	4	4.7								1030	
23	340	280	90	190	15	1.0	12	1.0	10	1.0	8	2.2	6	2.0	4	4.3						1250	
24	350	280	90	200	15	1.5	12	1.0	10	1.0	8	2.1	6	2.1	4	4.3						1400	
25	360	300	90	200	15	1.5	12	1.0	10	1.5	8	2.9	6	1.6	4	4.0						1570	
26	360	320	90	200	20	1.5	12	1.6	10	2.3	8	2.5	6	1.2	4	3.9						1870	
27	390	340	90	200	20	1.5	15	1.0	12	1.0	10	2.5	8	2.7	6	1.1	4	3.7				2170	
28	410	360	100	200	20	1.5	15	1.0	12	1.0	10	2.5	8	2.7	6	1.4	4	3.9				2340	
29	410	360	100	200	20	1.5	15	1.6	12	1.7	10	2.7	8	2.2	6	1.0	4	3.8				2550	
Maximale middenzwaarte	11	220	170	80	160	8	1.0	4	4.5													260	
	12	250	190	80	160	8	1.0	4	5.0													310	
	13	270	200	80	160	8	1.0	4	5.5													350	
	14	290	210	80	160	8	1.0	4	6.0													390	
	15	300	220	80	170	8	1.0	4	6.5													430	
	16	300	260	80	170	8	1.0	4	7.0														480
	17	310	260	90	180	8	1.0	4	7.5														520
	18	310	270	90	180	8	1.0	6	1.2	4	6.8												560
	19	340	290	90	180	8	1.0	6	1.3	4	7.2												660
	20	360	310	90	180	8	1.0	6	1.7	4	7.3												740
21	370	320	90	190	8	1.0	6	3.2	4	6.3												840	
22	380	340	90	190	8	1.0	6	3.8	4	6.2												920	
23	390	340	90	190	10	1.0	8	1.3	6	3.9	4	5.3										1100	
24	400	350	90	200	10	1.0	8	2.1	6	3.7	4	5.2										1220	
25	410	360	90	200	12	1.0	10	1.0	8	2.9	6	2.9	4	4.7								1460	
26	410	360	90	200	12	1.0	10	2.0	8	3.6	6	2.1	4	4.3								1610	
27	410	360	90	200	15	1.0	12	1.8	10	2.6	8	3.1	6	1.2	4							1950	
28	410	360	100	200	20	1.5	15	1.0	12	1.0	10	2.5	8	2.7	6	1.4	4	3.8				2340	
29	410	360	100	200	20	1.5	15	1.6	12	1.7	10	2.7	8	2.2	6	1.0	4	3.8				2550	

Opmerkingen: -Afmetingen gelden voor een halve roede
 -Indien wordt afgeweken van het plaatschema dient een controleberekening te worden gemaakt

Tabel 2 Plaatindelingen uit Bijlage B ref. 3.

Verder wordt opgemerkt dat de rechthoek hier wel een gemakkelijke vorm is, omdat hij zo in een bestaande as gestoken kan worden, maar voor een flensverbinding is een cirkelvorm beter. Dat komt ten eerste omdat de kracht op een oppervlakte in de doorsnede van een op buiging belaste balk

	Rapport berekening molenroede, een verificatie van uitgangspunten.	pagina 12 van 57
--	--	------------------

evenredig met de afstand tot de neutrale lijn toeneemt en de bijdrage aan de stijfheid met de afstand in het kwadraat.

Nu is ter plaatse van de flensverbinding misschien geen sprake meer van een balk maar er kan zeker van uitgegaan worden dat de bout op de hoek veel meer te verduren krijgt dan de bouten langs de zijkant, simpelweg omdat hij op een grotere afstand van de neutrale lijn voor buiging ligt voor een overhoeks moment. Voor een windmolen is dat zeker het geval, bij elke omwenteling roteert de momentvector van in het wiekvlak naar iets tussen 0 (wiek vertikaal) en plus of min 90 graden geroteerd (wiek horizontaal, belast door gewichtsmoment, windmoment en mogelijk remmoment).

De hogere stijfheid van de hoekbout veroorzaakt spanningsconcentratie. Dit wordt nog verergerd door het gat dat in de balk zit, waar de momentsleutel doorheen wordt gestoken. (zie zijaanzicht binnenroede). Dat gat zit erg dicht bij de flens. De krachtlijnen lopen er omheen en kunnen niet meer terugbuigen naar waar ze gelopen zouden hebben als er geen gat gezeten zou hebben. De bouten die eronder liggen doen dus weinig en dat moet overgenomen worden door de andere bouten, waaronder de eerder genoemde hoekbouten.

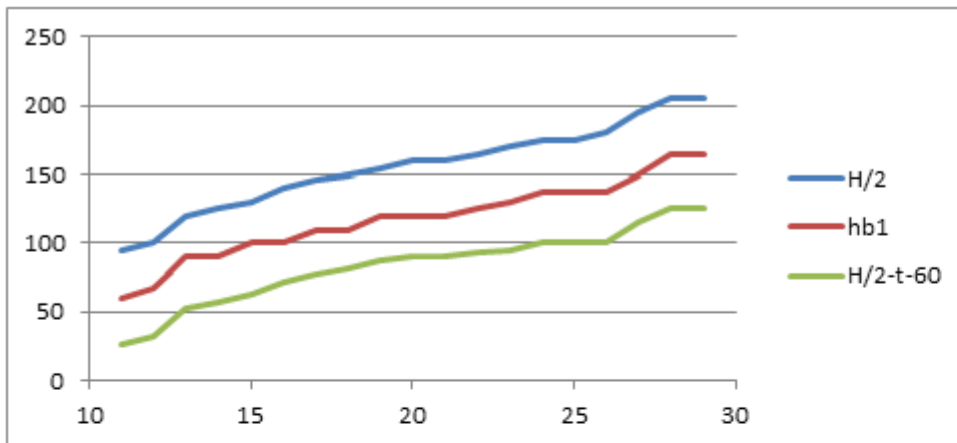
Hier zou misschien iets meer ruimte genomen kunnen worden. De momentsleutel dient dan van een verlengstuk voorzien te worden en het (cirkelvormig gemaakte) gat kan buiten de askop met een deksel afgesloten worden. Dat heeft tevens het voordeel dat er gemakkelijker geïnspecteerd en/of nagetrokken kan worden. Als de boutkoppen aan de andere kant met een borgplaat tegen meedraaien geborgd worden hoeft daar geen sleutel in gestoken te worden. Het deksel kan aan die kant blijven zitten bij inspectie.

Dan nog een opmerking over de dikte van de flens. Deze lijkt zo dun dat er elastische of plastische deformatie op kan treden onder extreme belasting. Verwezen wordt naar ref. 5 en 6 waarin een flensberekening gegeven wordt die rekening houdt met de spanningstoename in de bout tgv. deze vervormingen. In dit rapport is een vermoeiingsberekening gemaakt en daarbij is gebruik gemaakt van de compliantie van de constructie om de variatie in de boutspanning te berekenen.

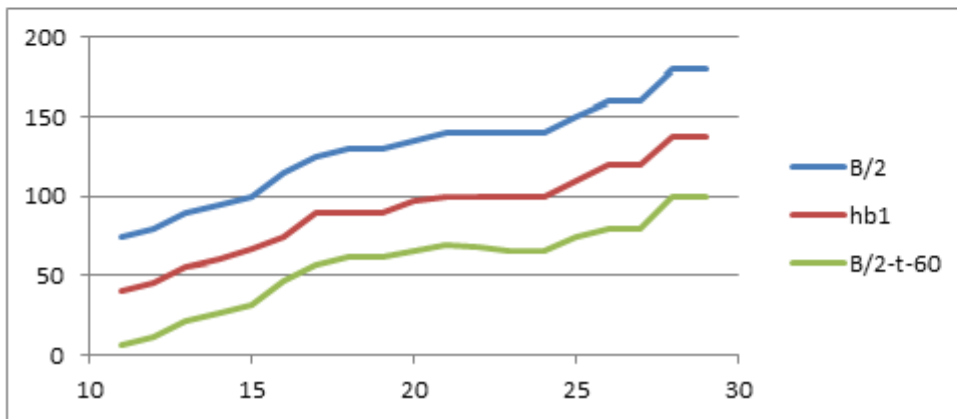
3.4 Positiefouten in tabel flensafmetingen in Fig. 8.16

Bij het berekenen van traagheidseigenschappen van de flens voor de $H \times B = 380 \times 340$ (maximale middenzwaarte) uit de gegevens van Fig. 8.16 worden foute posities van de hoekbout gevonden, niet centraal in de hoek en erg dicht bij het rechthoekige gat midden in de flens. Om die reden zijn alle posities uitgerekend en in een figuur weergegeven. hb1 is steeds de hoekboutpositie.

De minimale flensafmetingen zijn acceptabel, de coördinaten van de hoekbout liggen tussen de hoek van de roede en het hoekpunt van het rechthoekige gat midden in de flens. Zie onderstaande figuren:

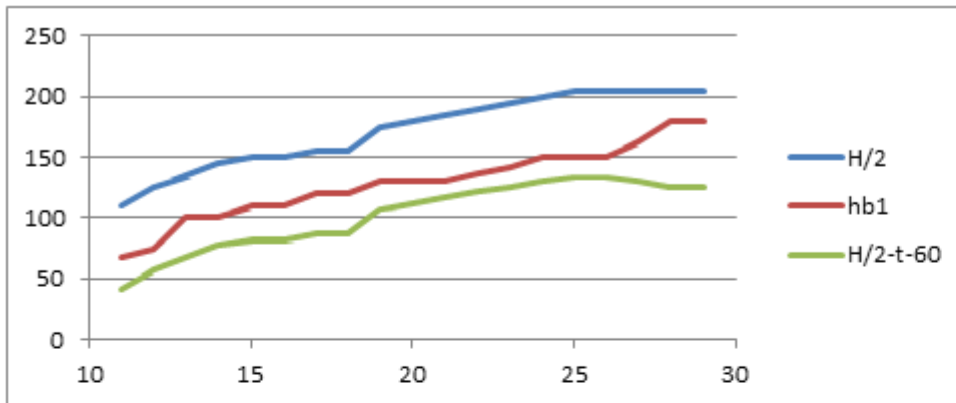


Figuur met de coördinaten van de hoekbout in x – richting van de minimale middenzwaarte als functie van de vlucht.

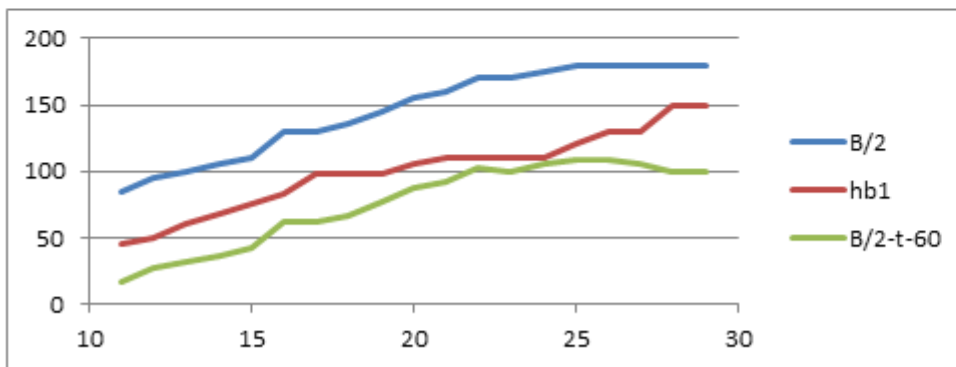


Figuur 1 Coördinaten van de hoekbout in y – richting van de minimale middenzwaarte als functie van de vlucht (horizontale as m, verticale as mm).

Nu echter dezelfde afmetingen in de maximale zwaarte:



Figuur met de coördinaten van de hoekbout in x – richting van de maximale middenzwaarte als functie van de vlucht.



Figuur met de coördinaten van de hoekbout in z – richting van de maximale middenzwaarte als functie van de vlucht.

Figuur 2 Coördinaten van de hoekbout in y – richting van de maximale middenzwaarte als functie van de vlucht (horizontale as m, verticale as mm).

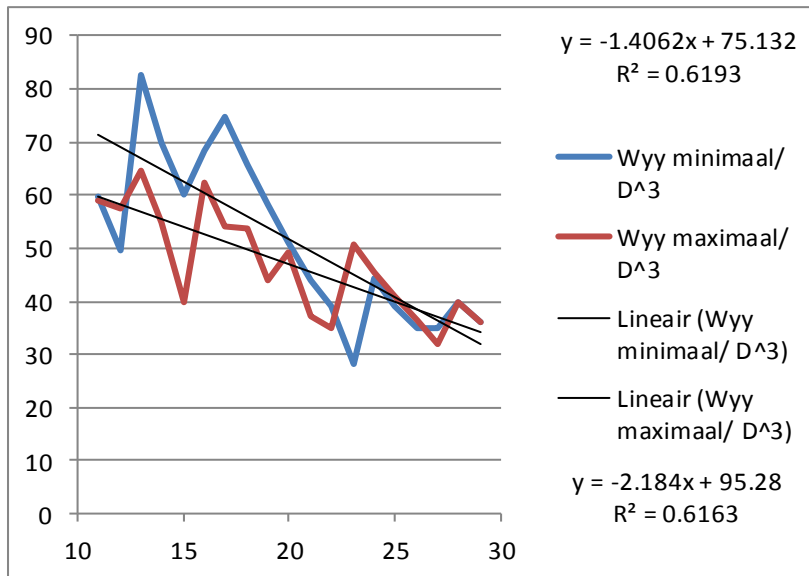
Sommige hoekbouten, zoals die van 22 m vlucht komen daardoor heel dicht bij het gat in de flens te zitten. In de richtlijn 2016 (ref. 8) is de tabel geheel herzien.

3.5 Verloop van weerstandsmomenten als functie van de vlucht

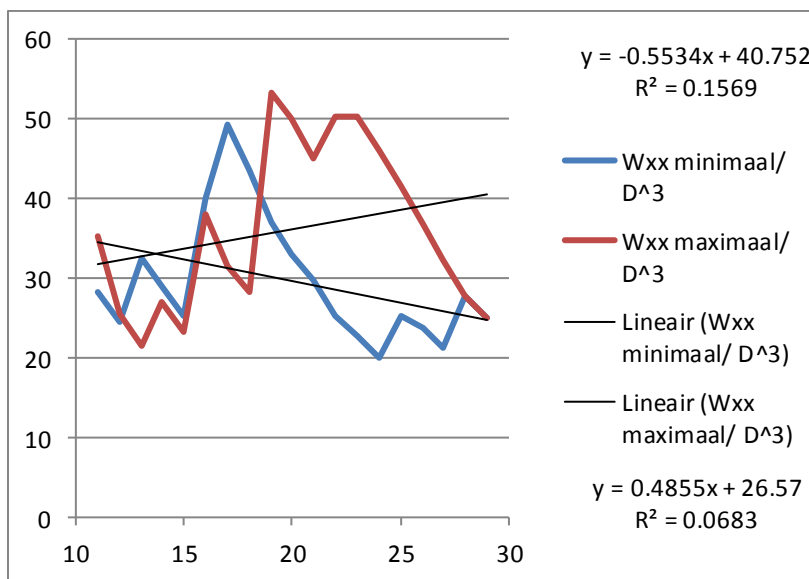
Het als functie van de vlucht verstreken van roede- en flensconfiguraties suggereert dat er een zekere mate van ordening is die een optimale configuratie geeft met minimum materiaalgebruik en maximale sterkte.

De voetmomenten zijn bij gelijkblijvende overige parameters theoretisch evenredig met de vlucht tot de derde macht (zie Berekening prestatie curven). Van alle configuraties zijn de weerstandsmomenten van de roede in het midden uitgerekend en gedeeld door D^3 en grafisch weergegeven.

De grafieken tonen een dalende trend, vooral voor het moment dat de axiale belasting opneemt. Dat duidt op een grotere efficiëntie (minder veiligheid) in het ontwerp bij grotere molens. De spreiding in de ontwerpen is wel groot, en groter bij W_{xx} dan bij W_{yy} en tevens groter bij de maximale zwaartes. Ook is het niet logisch dat soms de sterkte van de minimale zwaarte hoger is dan van de maximale.



Figuur 3 Wyy/ D^3 (moment axiale belasting) van de middenzwaartes als functie van de vlucht.



Figuur 4 Wxx/ D^3 (moment tangentiële belasting) van de middenzwaartes als functie van de vlucht (vertikale as dimensieloos).

Een conclusie zou kunnen zijn dat hier nog optimalisatie mogelijk is.

Conclusies bij ref. 1, 2 en 3 :

1. De flensberekeningen laten bij hoge uitwendige belasting allemaal flenskanteling zien, beginnend op de hoek. Deze kanteling heeft meer of minder ernstige spanningsverhoging in de bout tot gevolg die kan leiden tot vroegtijdig bezwijken.
2. De indeling in minimale middenzwaarte en maximale middenzwaarte is wel effectief voor de roede, maar voor de flensverbinding zijn er tegengesteld werkende effecten, zoals het constant houden van de flensbreedte voor alle ontwerpen.

	Rapport berekening molenroede, een verificatie van uitgangspunten.	pagina 16 van 57
--	--	------------------

3. Het gat in de roede voor het aanhalen van de bouten zit te dicht bij de flens. Een deel van de bouten functioneert daardoor minder hetgeen de toch reeds aanwezige spanningsconcentratie rond de hoekbouten verergert. Het verschuiven van deze gaten naar buiten de askop is aan te raden.
4. Voor de grote molens is de levensduur onvoldoende gegarandeerd.
5. De berekening van de rotorbelastingen volgens ref. 1 is goed voor de extreme gevallen in de roede, maar het vermoeiingsspectrum is onvoldoende voor molens met een zwaar werkregiem.
6. De berekening van het vangkoppel volgens ref. 1 is fout.

4 Reactie op aanvullende rapporten

Ref. 8, 9 en 10 zijn later toegezonden en betrof een aanpassing en herberekening van de boutverbinding, uitgevoerd door Stemar Engineering

Bij Ref. 9 Design verification. Toelichting op richtlijn 2016:

1. De belastingen zoals berekend met het rekenschema Wassenaar houden geen rekening met koppeltoename bij afnemend toerental. Dat is wel nodig. Neem het rekenvoorbeeld op p. 72 van het rapport Verificatie richtlijn 2016. Het koppel bij 13 m/s en 25 rpm wordt berekend op 36439 Nm. De hoeksnelheid is 2.62 rad/s. Daarmee wordt een vermogen gevonden van $4 \cdot 2.62 \cdot 36439 = 382$ kW. Dat is een enorm vermogen, het is de vraag of, als de molen in deze situatie op de vang gezet wordt dit vermogen geremd kan worden. Waarschijnlijk kan de vang dit vermogen niet leveren en de molen dus niet stoppen (zie Bijlage Berekening vangkoppel in een wiek en in de as). De lezer van deze rapportage wordt op het verkeerde been gezet met een belastinggeval dat, zodra het in werkelijkheid voorkomt, aanleiding moet geven tot zware overbelasting en niet alleen van de vang maar mogelijk ook van andere onderdelen.
2. Geadviseerd wordt hier in ieder geval een waarschuwende kanttekening bij te plaatsen dat dit een zwaar geval is en dat toepassing in de praktijk afgeraden wordt tenzij het zeker is dat de molen hierop uitgelegd is qua dimensionering en vermogensregeling.
3. De enige omstandigheid waarbij een dergelijk zware bedrijfsomstandigheid verdragen zou kunnen worden is bij een molen met een zwichtmechanisme met bijv. met de hand of door winddruk bediende jalouzieën. Deze kan zo bediend worden dat de wiek voor het grootste deel gezwicht is zodat er geen axiale kracht en ook geen lift opgebouwd wordt en de molen kan hiermee gestopt worden. Dit kan bij het geval vermeld worden. Voor molens met zelfzwichtend mechanisme is de regelkarakteristiek van belang. Het mechanisme mag natuurlijk niet centrifugaal geregeld zijn want dan gaat bij een toerendaling de molen weer voluit trekken en kan de vang de molen nog steeds niet stoppen.
4. Dit geldt overigens niet alleen voor dit rapport, het geldt voor alle tot nu toe besproken rapporten. In dit rapport zijn echter de spreadsheet tabellen gegeven met het berekende vermogen dat gemakkelijk verwarring kan veroorzaken.

	Rapport berekening molenroede, een verificatie van uitgangspunten.	pagina 17 van 57
--	--	------------------

5. In dit rapport wordt als plaatmateriaal van de roede S355J2 aangeraden. In dat kader is de op p. 36 geplaatste opmerking: “De spanningen bij de piekbelasting bedragen maximaal 193 MPa, hetgeen lager is dan de toelaatbare $1.5 f = 355 \text{ Mpa}$ ” onduidelijk.
6. De opmerking op p. 50: “Alleen bij de axiale belasting ontstaat een buigmoment in de deling. Bij de tangentiële belasting ontstaat een dwarskracht ter plaatse van de deling. Dwarskracht = $2 * 70 \text{ kNm} / 0.900 \text{ m} = 156 \text{ kN}$ over de totale verbinding van 22 bouten M20 klasse 10.9.” lijkt alleen algemeen geldig als het moment links en rechts hetzelfde teken hebben en even groot zijn. Gebleken is dat dat alleen windmomenten kunnen zijn en dat eigen gewichtsmomenten een tegengesteld teken hebben en veel groter kunnen zijn, wat tot een onderschatting van boutbelastingen leidt. Het lijkt beter daarom deze stelling niet toe te passen en in plaats daarvan te rekenen met het maximum moment.
7. Het in niet meer dan drie wiekstanden berekenen van spanningen tgv. axiale en tangentiële belastingen kan tot onderschatting van spanningen leiden als de gecombineerde belasting tot een groter resulterend moment aanleiding geeft op een andere wiekstand ergens ertussenin. Vooral de spanning op de zwaarst belaste hoek (in las, flens of bout) kan daardoor onderschat worden. Uiteraard is dit een gevolg van het niet voorschrijven van belastingen als functie van de tijd (of azimuth). Zie aanbevelingen voor het alternatief.
8. In Bijlage F worden een aantal aanbevelingen gedaan voor de toepassing van bouten zoals berekend in Ref. 10. Daarbij worden echter geen conclusies gegeven aangaande de berekende levensduren (zie conclusie 3 uit het volgende).

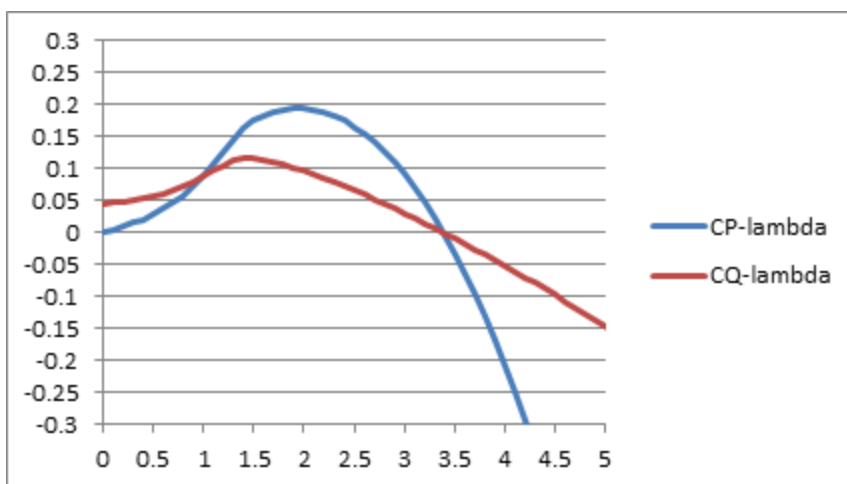
Bij Ref. 10 Design verification. Aanpassingen delingsflens:

1. De aangepaste tabel in Appendix II geeft de dimensies van de opnieuw bepaalde flens voor minimale resp. maximale middenzwaarte. In de laatste is de kolom met het aantal stuks gekopieërd uit de eerste. Dat aantal is daar echter niet gelijk aan $2*(m+n)$ hetgeen in de eerste tabel wel klopt. Als m en n kloppen moet deze kolom waarschijnlijk aangepast worden.
2. Er worden geen boutspanningen getoond van de tussenliggende bouten. Met name de bouten die onder het gat liggen waar de momentsleutel doorheen gestoken wordt kunnen vrijwel geen krachten overdragen gezien het feit dat de krachtlijnen om het gat heen weer terug moeten buigen en daar te weinig balklengte voor hebben. De problemen van overbelastingen op de hoeken kunnen hierdoor verergerd worden. Gezien het belang van een goed flensontwerp lijkt mij dit een punt dat meer aandacht behoeft. Zie aanbevelingen.
3. Er wordt verschillende keren gesteld dat er kieren optreedt maar dat de flenzen strak tegen elkaar worden gehouden. Echter ook bij tegen elkaar zittende flenzen kan de bout nog een hogere spanning te verduren krijgen dan bij eenzelfde situatie zonder kieren (Zie Ref. 6).
4. De boutlevensduren die berekend worden zijn onvoldoende. Zie aanbevelingen.

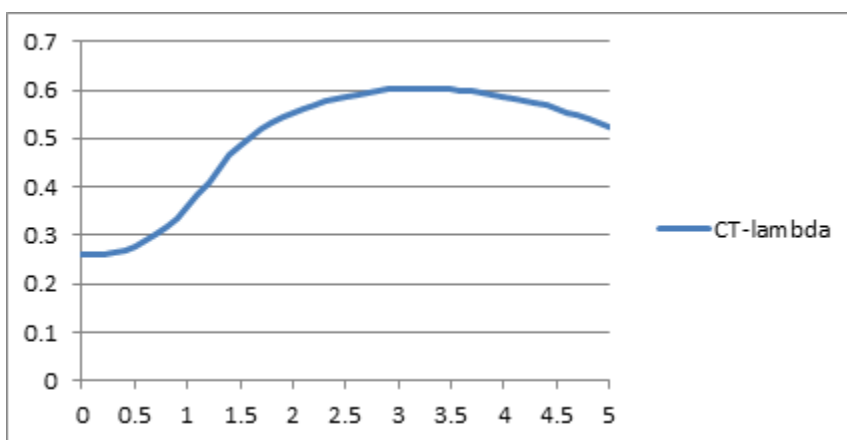
5 Berekening prestatie curven

Het berekenen van de belastingen in de wijk met een rotorperformanceprogramma wordt inzichtelijker wanneer de dimensieloze prestatiecurven van de windrotor bekend zijn. In dit hoofdstuk worden uit de ter beschikking staande gegevens een aantal van deze curven afgeleid. Samenvattend kan gesteld worden dat de CP en CQ curves vergeleken kunnen worden met de vermogens- resp. koppel – toerenkromme van een motor. De CT geeft een weerstandsfactor zoals gebruikt bij de berekening van de windbelasting op een constructie.

Er zijn twee soorten profielen beschouwd, het oud-hollandse profiel dat nog steeds veel in gebruik is en een aantal verbeterde profielen, die als groep weergegeven zijn in ref. 1 en ook veel gebruikt worden (bijv. geDekkerde wieken of wieken met een Busselneus). De eerste soort geeft een lagere prestatiecurve dan de tweede. Van beide zijn de dimensieloze curves berekend en weergegeven. De profieldata die daarbij gebruikt is komt uit ref. 1 (bijlagen III en IV, die weer verwijst naar ref. 4).



Figuur 5 Dimensieloze performance curven van een rotor met profielen volgens lijn a.



Figuur 6 Dimensieloze rotorthrust van een rotor met profielen volgens lijn a.

Het asvermogen P en de axiale kracht T wordt berekend met:

$$P = CP * \frac{1}{2} * \rho * V^3 * \pi * R^2 \text{ en } T = CT * \frac{1}{2} * \rho * V^2 * \pi * R^2,$$

met ρ de luchtdichtheid, V de windsnelheid ver voor de rotor en R de tipstraal van de rotor, $CP(\lambda)$ de vermogenscoëfficiënt als functie van de snellopendheid λ en $CT(\lambda)$ de thrustfactor als functie van λ . Het askoppel Q volgt evenzo uit:

$$Q = CQ * \frac{1}{2} * \rho * V^2 * \pi * R^3, \text{ de dimensieloze koppel toeren kromme met daarin } CQ(\lambda) \text{ de koppelcoëfficiënt als functie van } \lambda.$$

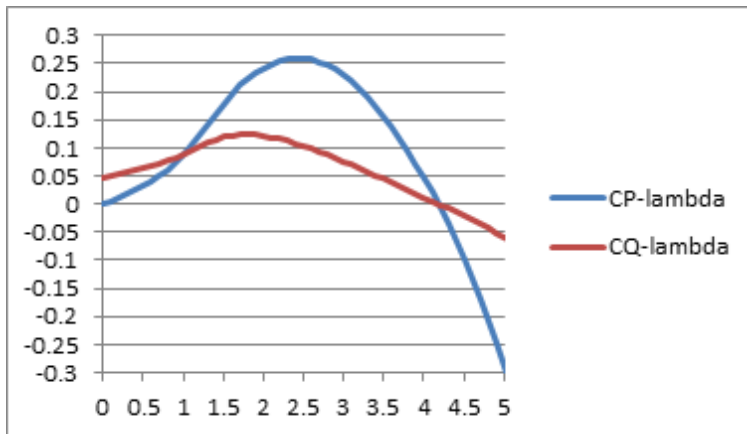
Op de horizontale as staat de dimensieloze tipsnelheidsverhouding (of snellopendheid) λ :

$\lambda = \frac{\Omega * R}{V}$, met Ω de rotorhoeksnelheid. Analoog aan $P = Q * \Omega$ geldt $CP = CQ * \lambda$. Voor bereiken van maximale rotorefficiency moet λ gelijk zijn aan de optimale of ontwerptipsnelheidsverhouding λ_0 . Dit is een rotoreigenschap die konstant verondersteld mag worden als de hoekstand en het zeiloppervlak niet veranderen. Er is geen curve berekend met een gereduceerd zeiloppervlak.

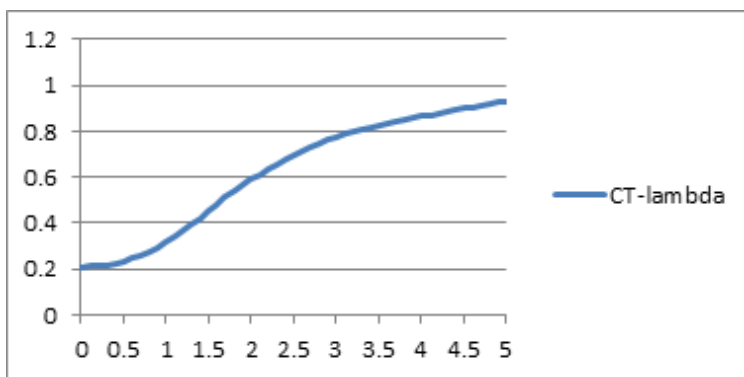
Bij de curve uit Figuur 5 en Figuur 6 is de snellopendheid λ_0 waarbij maximale rotorefficiency bereikt wordt ongeveer 1,9, wat wil zeggen dat de tip van de windturbine 1,9 keer zo snel gaat als de windsnelheid voor de rotor. De rotor van de oud-hollandse molen met een gemoderniseerd wiekprofiel haalt $CP = CP_0 = 0,25$ tot $0,30$, wat ongeveer de helft is van het theoretisch maximaal haalbare (de Betz limiet). Bij een moderne turbine is $\lambda_0 = 9$ en kan een $CP_0 = 0.5$ gehaald worden.

De rotor met oud-hollandse profielen toert onbelast op naar maximaal $\lambda = 3.3$, waar CP en $CQ = 0$ zijn. Dat betekent dat het onbelaste rotortoerental n bij een windsnelheid van 5 m/s gelijk is aan:

$n = \Omega * \frac{30}{\pi} = \frac{30}{\pi} * \frac{\lambda * V}{R} = 9.55 * \frac{3.3 * 5}{11} = 14,3$ rpm ofwel 57 einden. Bij het gebruik van maalstenen in een korenmolen is de last relatief gering, vooral bij wat hogere windsnelheden (het neemt weinig toe met het toerental). Dan wordt dit toerental gemakkelijk gehaald, zeker als er bijv. een van de twee maalstenen uitgeschakeld is.



Figuur 7 Dimensieloze performance curven van een rotor met profielen volgens lijn c.



Figuur 8 Dimensieloze rotorthrust van een rotor met profielen volgens lijn a.

Opgemerkt wordt dat het sterk negatief worden van CP en CQ bij moderne windturbines wel kan maar bij Oud-Hollandse niet, omdat in die toestand de wind dan van achteren komt wat leidt tot klapperen van de zeilen. De rotor van de molen met verbeterde profielen toert onbelast op naar:

$$n = \Omega \cdot \frac{30}{\pi} = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{\lambda \cdot V}{R} = 9.55 \cdot \frac{4.2 \cdot 5}{11} = 18,2 \text{ rpm ofwel } 73 \text{ einden.}$$

Merk tevens op dat het maximum rotorkoppel bij 13 m/s voor een molen (met een vlucht van 22 m) gelijk is aan:

$$M_x = CQ_{\max} \cdot 0.5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot \pi \cdot R^3 = 0.125 \cdot 0.5 \cdot 1.25 \cdot 13^2 \cdot \pi \cdot 11^3 = 55208 \text{ Nm.}$$

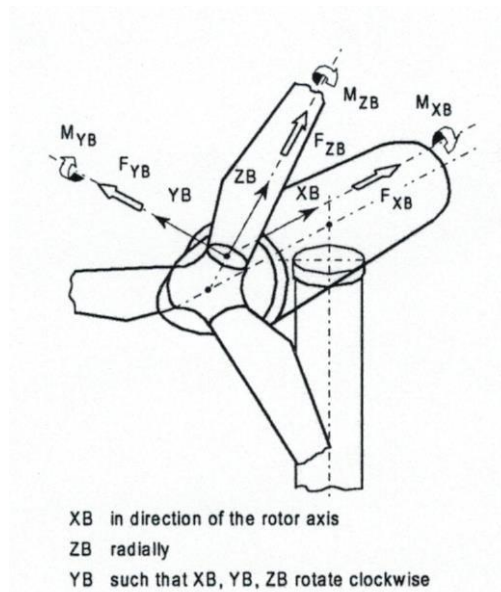
Als de molen onbelast draait is het koppel laag (alleen de wrijving), maar bij afremmen wordt het steeds groter. Het vangkoppel moet groter zijn dan het maximum koppel dat tijdens het remmen gepasseerd wordt anders stopt de molen niet.

De getoonde prestatiecurves zullen gebruikt worden bij de berekening van de belastingen in de wijkbevestiging.

6 Berekening rotorbelastingen

6.1 Definitie assenstelsel

Voor de definitie van het assenstelsel wordt het in de windenergie wereld algemeen gebruikelijke assenstelsel van de GL richtlijn gehanteerd. Hier wordt het stelsel in de wijkvoet weergegeven, voor de askop, de gondel en de toren zijn er vergelijkbare definities. Tov. ref. 1 zijn y en z verwisseld.



Figuur 9 Definitie coördinatensysteem in de wijk

Voor een aantal configuraties worden roede en asbelastingen bepaald.

Molen	Vlucht (m)	Zeil profiel	Last	Middenzwaarte Incl. dikte wand (mm)	breedte zeil (m)	breedte totaal (m)
Grote zwaar	29	Lijn b	Gemaal	410x360	2,0	2.25
Kleine zwaar	22	Lijn b	Gemaal	380x340	2.0	2.25
Kleine licht	22	Lijn a	Koren	330x280	2.75	3.0

Tabel 3 Overzicht uitgevoerde berekeningen

6.2 Kleine molen minimale middenzwaarte

De belastingen op de flensverbinding in de askop worden geverifieerd. Begonnen wordt met de kleine molen (vlucht 22 m) als berekend in Ref. 1 De uitgangspunten zijn daarbij:

Een romp en stelling als van een Oud-Hollandse molen. Er zijn belastingen berekend op een model dat zoveel mogelijk overeenkomt met de in ref. 1 uitgerekende molen. Dat betekent:

vlucht 22 m

ashelling 14 deg

constant toerental (25 resp. 35 rpm)

windsnelheid 13 m/s

windschaduw van de romp om belasting op wiekroede realistisch te maken

windshear idem

een belastingspectrum van een extreem geval (13 m/s) en een vermoeiingsgeval (9 m/s)

profieltype lijn a volgens ref. 1. (zie Bijlage Profieieigenschappen)

achtkant volgens rompmodel Puurveense molen, Kootwijkerbroek.

Tabel 4 Uitgangspunten kleine molen minimale middenzwaarte

	ref. 1 25 rpm	Ber. 25 rpm	ref. 1 35 rpm	Ber. 35 rpm	
Fxfix N	68316	38077(avg)	87780	43191(avg)	incl. massabel.
Mxfix Nm	76160	38209(avg)	13468	11321(avg)	
Mx1 Nm windbelasting	19040		22487		
Mx1 Nm permanent	37647		37647		
Mx1 totaal	56687	41374	60134	34890	incl. massabel.
My1 Nm windbelasting	65830		106370		
My1 Nm permanent	9387		9387		
My1 Nm totaal	75217	70100	115757	88040	incl. massabel.
Mz1 Nm	10522	3877		-3740	
Fz1 N	26657	36130	57096	59750	centrif.+ gravity.
gF (belastingfactor)		1		1	

Tabel 5 Berekende extreme belastingen

De grootheden Fxfix en Mxfix zijn de axiale askracht en het askoppel berekend in een vast assenkruis. In ref. 1 wordt onderscheid gemaakt tussen windbelastingen en permanente belastingen waarmee massabelastingen bedoeld worden. Dat zijn de eigen gewichtsbijdragen en de centrifugaalkracht. De berekening volgens ref. 1 houdt geen rekening met axiale inductie volgens de impuls wet. Daardoor kan voor een windrotor die op λ_0 draait (op de ontwerpsnellopendheid ofwel optimaal) de windsnelheid vlak voor de rotor met 1/3 afnemen (zie Berekening prestatie curven).

Bij hogere snellopendheden neemt dat nog verder toe. In het geval voor 13 m/s zijn de actuele lambda's:

V = 13 en n = 25 rpm: lambda_25 2.22

V = 13 en n = 35 rpm: lambda_35 3.10

Beide zijn hoger dan de ontwerpsnellopendheid van 1.9 dus het maakt inderdaad veel uit. Dit wordt zichtbaar in de axiale kracht op de rotor en op de buigende momenten uit het rotorvlak op de roeden tpv. het rotormidden.

Bij slechte profielen (lage lift en hoge weerstand) wordt het moeilijker een rotor aerodynamisch goed te ontwerpen. Dat dit hier ook zo is, is te zien aan de CT-lambda curve, in het ontwerppunt zou daar CT = 8/9 = 0.89 moeten zijn, gehaald wordt echter slechts 0.54.

De lastkarakteristiek is niet gedefinieerd. Het maakt uit of de rotor gemakkelijk in toeren kan fluctueren. Bij een generator met een steile karakteristiek worden de toerenvariaties verhinderd en dat resulteert in koppelvariaties die niet alleen in de as gevoeld worden maar ook in de wiekroede.

In ref. 1 wordt de meest ongunstige wiekstand gebruikt om zowel een dynamische belasting te bepalen als een extreme belasting, beide bij 13 m/s.

Omschrijving	Ref. 1 25 rpm	Ber. 20 rpm
Fxfix	68316	26669(avg)
Mxfix	76160	13933(avg)
Mx1 Nm windbelasting	19040	
Mx1 Nm permanent	37647	
Mx1 totaal	56687	37290
My1 Nm windbelasting	65830	
My1 Nm permanent	9387	
My1 Nm totaal	75217	39510
Mz1 Nm	10522	-1150
Fz1 N	26657	24770
gF	1	1

Tabel 6 Vermoeiingsbelastingen bij 9 m/s

Het vermoeiingsgeval volgens de berekening bij 20 rpm in Tabel 5 is een aanname. Zie berekening boutspanning voor uitgangspunten en verdere resultaten. Deze tabel is gemaakt ter vergelijking met de vermoeiingsbelasting van ref. 1.

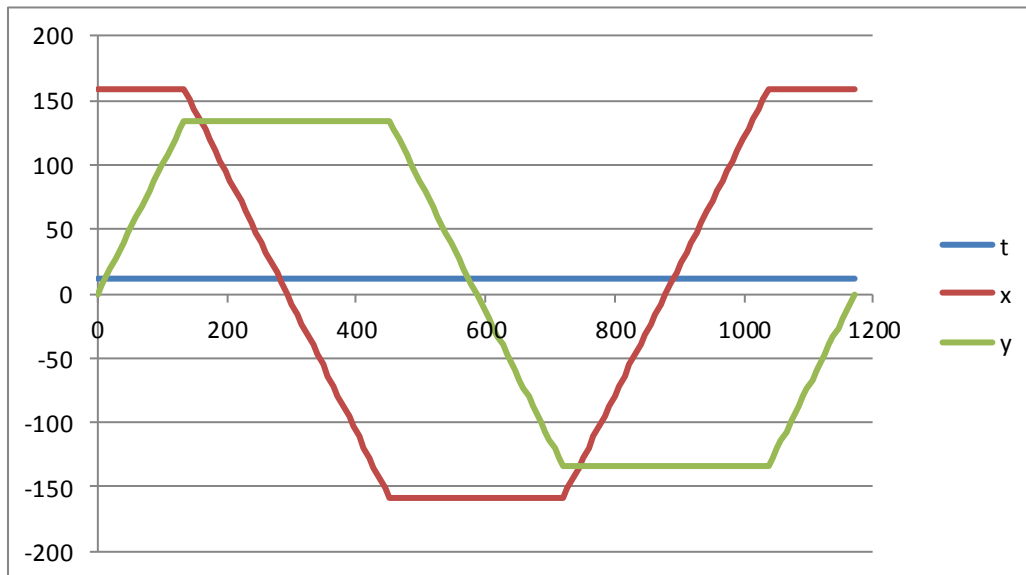
6.3 Flens minimale middenzwaarte vlucht 22 m

De flensafmetingen zijn 330x280 mm (zieBijlage Flensafmetingen).

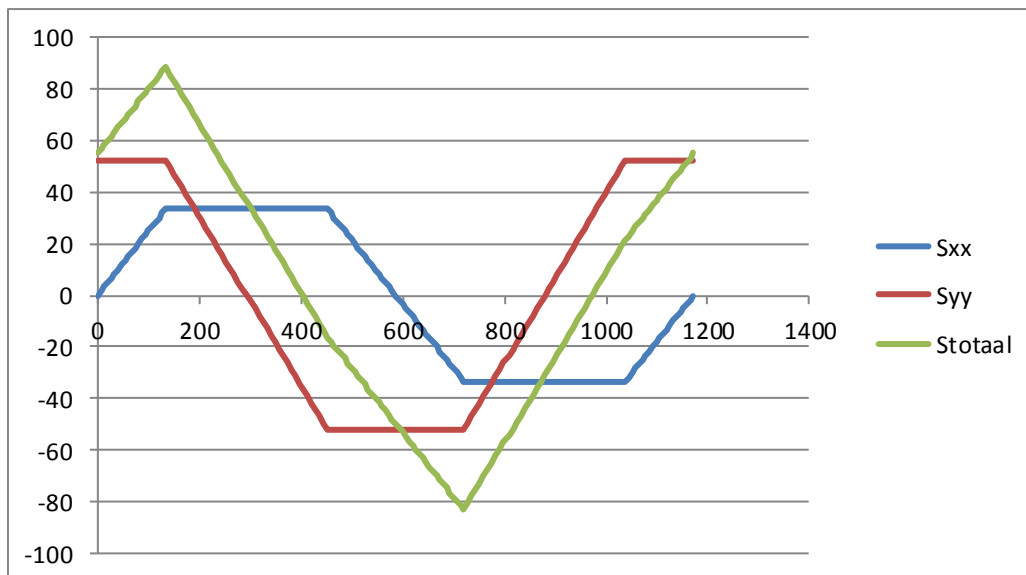
Omdat bekend is welke bout het zwaarst belast wordt hoeven we maar één bout uit te rekenen. De gevolgde rekenprocedure gaat als volgt:

1. Bereken de coördinaat van de hoekbout: $(b_x, b_y) = (125, 100)$.
2. Bereken de coördinaat van de middens van de wand: $(m_x, m_y) = (330-12)/2, (280-12)/2 = (159, 134)$.
3. Bereken de coördinaat van het hoekpunt van het rechthoekige gat in de flens: $(h_x, h_y) = (330/2-12-60, 280/2-12-60) = (93, 68)$.
4. De hefboomverhouding waarmee de kracht in de wand de flens openwrikt is: $(a+b)/a = 2.0625$ met $a = (125, 100) - (93, 68) = (32, 32)$ (in beide richtingen gelijk) en $b = (159, 134) - (125, 100) = (34, 34)$ (idem). Deze verhouding blijft gelijk voor de diagonale richting, ondanks het toenemen van a en b.
5. Bepaal de lijnbelastingen L_{xx} en L_{yy} en $L_{totaal} = L_{xx} + L_{yy}$ door de spanningen S_{xx} en S_{yy} te vermenigvuldigen met de wanddikte t. Deze lijnbelastingen kunnen geïntegreerd worden over het deel van de wand bij een bout en daarmee wordt de trekkracht uit de wand berekend op het stukje flens ter plaatse van die bout (zie fig L_{xx} , L_{yy} , L_{totaal}).

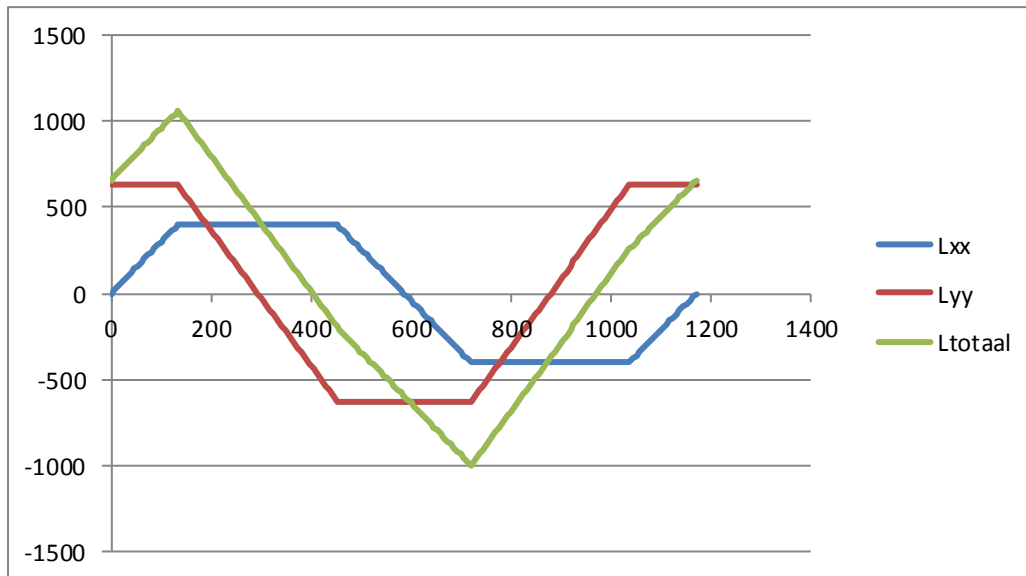
6. Met een boolean variabele die aangeeft of de bout binnen een hoekbreedtemaat vanaf de hoek zit wordt de kracht op de bout als functie van de omtrek bepaald (zie Figuur 13). Omdat die het zwaarst belast wordt zijn de andere bouten niet belangrijk meer, want niet bepalend.
7. Bepaal de hoogste boutspanning (zie vervolg).



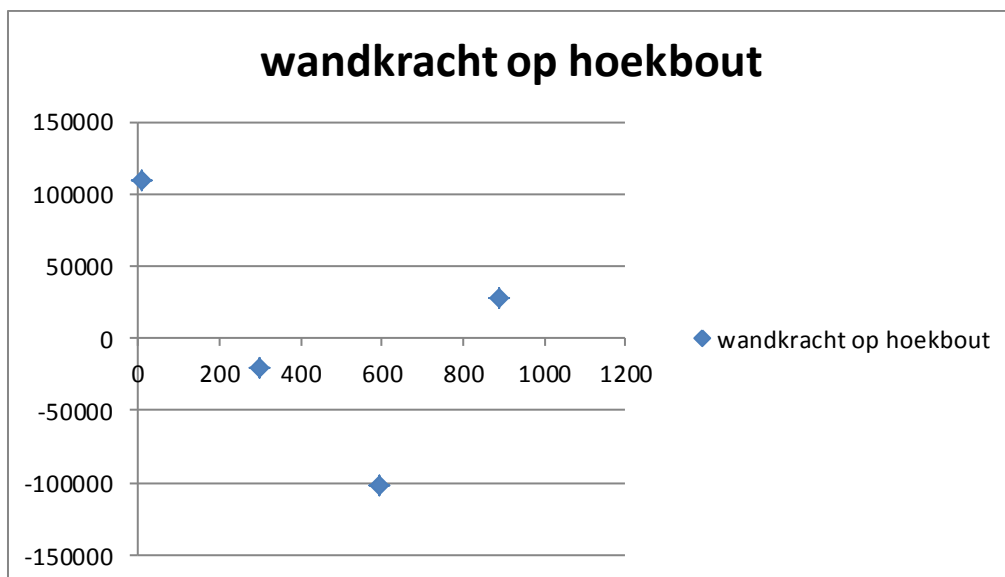
Figuur 10 Verloop coördinaten midden wand en wanddikte rondom de roede (horizontaal omtrekscoördinaat mm, vertikaal afmeting mm).



Figuur 11 Verloop wandspanning (Mpa) $t_{gv}M_{xx}$, M_{yy} en F_z in de wand van de roede ($gF=1$).



Figuur 12 Verloop van de lijnbelastingen L (N/mm) midden op de wand (gF=1).



Figuur 13 Verloop van wandkrachten op 4 hoeken in N (gF=1.1).

De boutkracht is gelijk aan de wandkracht maal de reductiefactor Φ_n maal een hefboomeffect.

De flens heeft 18 bouten. Φ_n is de spanningsreductiefactor wegens het flenseffect: doordat de voorspankracht de flens samengeknepen houdt wordt slechts de fractie Φ_n van de wandkracht doorgegeven naar de bout.

Twee hoeken worden licht belast en twee zwaarder. Daarvan is alleen de op trek belaste belangrijk want de op druk belaste drukt de flensdelen op elkaar en zal nooit gaan kieren. De op trek belaste heeft ook de hoogste wandkracht/spanning van de twee.

Als voorspanning wordt $F_v=170$ kN genomen. Hoger is riskant, de bout kan door de extreme belasting gaan vloeien. Als dat eenmalig gebeurt en de kracht overschrijdt niet de breukgrens dan is het

acceptabel. Als dit vaker gebeurt (bijv. cyclisch tijdens stops bij harde wind) leidt het tot breuk. Het bijbehorende aanhaalmoment is 295 Nm.

$M_t = 295.1 \text{ Nm}$ met $F_v = 170 \text{ kN}$ normale F_v
 Gebruikte formule voor M_T :

$$M_T = F_v \cdot (0,157 \cdot P + 0,577 \cdot d_2 \cdot \mu_G)$$

Dit lijkt haalbaar met een aanhaalfactor $\alpha = 1.6$ (VDI 2230 Ref. 5), mits de draad en het kopvlak goed gesmeerd worden, de bijbehorende spreiding is 23%. Een moment van $1.23 \cdot 295 \text{ Nm} = 362 \text{ Nm}$ volstaat dan om minstens 170 kN te halen.

Boutspanningen extreem (13 m/s 25 rpm)

bout	M20	10.9
A_s	245	mm ²
A_k	225	mm ²
t_flens	20	mm
M_T	362	Nm
spoed	2.5	mm
μ	0.12	-
d2	18.376	mm
Dm	26	mm
Fv	170000	N
ringdikte	3	mm
Φ_n	0.169	-
σ_b	1123	N/mm ²

Tabel 7 Boutspanningsberekening met Φ_n

$\Phi_n = 0.9 \cdot \delta_p / (\delta_s + \delta_p)$ met δ_s en δ_p de complianties van de bout en het flenspakket (twee flensen + ringen).

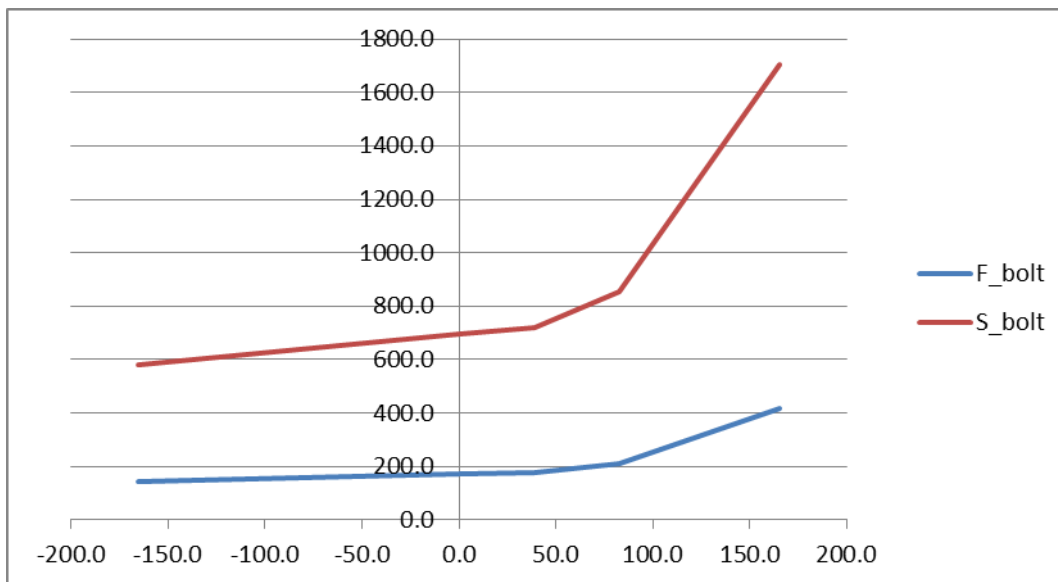
De boutspanning is te hoog, de spanningsreserve is:

$$SRF = (\sigma_{02R} \cdot gM) / (F_v / A_s + F_{\text{betrieb}} / A_s \cdot gF \cdot \Phi_n) = 0.73$$

Met $\sigma_{02R} = 900 \text{ Mpa}$, $gM = 1.1$, de voorspankracht $F_v = 170 \text{ kN}$, $A_s = 245 \text{ mm}^2$, $Z_{\text{wand}} \cdot gF = 109 \text{ kN}$, $gF = 1.1$ (Abnormaal geval, zie Ref. 11, Bijlage Partiële factoren IEC 61400 Windturbinenorm). Jammer genoeg is Φ_n in werkelijkheid veel hoger, aanwezigheid van het flenseffect is niet realistisch: de flens gaat kieren (zie ref. 6 en gegevens in Tabel 7). Als de wandkracht groter is dan de waarde $Z1 = 39 \text{ kN}$ maar kleiner dan $Z2 = 83 \text{ kN}$ mag $\Phi_{n, \text{korr}} = 0.725$ gebruikt worden, echter de kracht is zelfs groter dan $Z2$ en dan geldt $\Phi_n = 1$. Het reductieeffect is dan volledig geëlimineerd. De boutkracht is 275 kN, de boutspanning is 1123 MPa en daarmee wordt $SRF = 0.73$ gevonden. Veel te laag dus, de boutspanning is boven de breekgrens en de bout kan daardoor taai bezwijken.

		Z_wall	F_bolt	S_bolt
		-165.7	142.4	581.9
hier Φ_n gebruiken		0.0	170.0	694.5
	Z_1	38.6	176.4	720.7
hier Φ_n ,korr gebruiken		38.6	176.5	720.9
	Z_2	82.8	208.5	851.9
hier geen Φ gebruiken		82.9	208.8	852.9
		165.7	417.1	1703.8

Tabel 8 Gebruik van Φ_n volgens Schmidt-Neuper voor bout M20 en flens 330x280



Figuur 14 Verloop van boutspanning in MPa en -krachten in kN als functie van de wandkracht Z.

Het berekenen van de boutspanning bij 13 m/s en 35 rpm heeft geen zin, de SRF wordt nog lager wegens nog hogere extreme belastingen, evenals voor remmen met de vang (SRF=0.65), zie ook Tabel 9).

6.4 Berekening vermoeïngsbelasting 22m molen

Voor de berekening van de levensduur bij normaal bedrijf moet een aanname gedaan worden over het belastingsgeval. Voorlopig wordt uitgegaan van een 'pronkmolen' die slechts incidenteel draait. Daarvoor wordt een enkel geval aangenomen wat natuurlijk een groffe oversimplificatie is. Het gaat hier echter niet om het echt berekenen van de levensduur van zo'n molen maar om een indruk te verkrijgen hoe de flensverbinding zich houdt in een denkbare situatie.

Uitgangspunten:

- Vlucht 22 m, minimale middenzwaarte 330x280
- Windsnelheid 6, 7, 8 of 9 m/s incl. windshear en windschaduw van de romp
- Rotortoerental 13, 15.6, 17.8 of 20 rpm respectievelijk.

Rapport berekening molenroede, een verificatie van uitgangspunten.	pagina 28 van 57
--	------------------

- Boutspanning berekend met trilineair model volgens Schmidt-Neuper (zie Figuur 14).
- De vermoeiingssterkte is categorie 50 volgens Eurocode 3 (z.g. schlussgerollt).

De gewenste technische levensduur is 50 jaar zie ref. 3. Het bijbehorende aantal wisselingen wordt berekend door 3 uur/week bedrijf te veronderstellen, wat in totaal 7800 uur oplevert. Het berekende geval duurt 10 min ofwel 1/6 uur. Het aantal keer dat dit in rekening gebracht wordt is dan $6 \times 7800 = 24960$ keer.

De levensduur wordt berekend door:

1. Bepaal eenheidskrachten van zwaaimoment, klapmoment en langskracht. Daarbij wordt gebruik gemaakt van het spreadsheet dat hierboven beschreven is. De wandkracht kan met deze drie constanten geschreven worden als een lineaire combinatie van $M_{xx}(t) \cdot e_x + M_{yy}(t) \cdot e_y + F_z(t) \cdot e_z$.
2. Bereken hiermee de wandkracht als functie van de tijd t en rainflow die (indelen in groottes van wisselingen met bijbehorende aantallen voorkomen in de levensduur, zie bijv. NEN 2063 of Eurocode 3 ref. 7).
3. Bereken in het eerder gebruikte spreadsheet met de trilineaire boutkrachtfunctie de bijbehorende boutspanningsvariaties en daarmee de cumulatieve vermoeiingsschade D volgens Palmgren-Miner en de levensduur L_{bout} . De gebruikte categorie is 50 (Eurocode, ref. 7). De belastingfactor $g_F=1.0$ en $g_M=1.1$ voor de vermoeiingsberekening (conform Ref. 11). Voor de berekening van de extreme spanning van de vermoeiingsgevallen (Normaal geval) wordt conform Ref. 11 $g_F=1.35$ toegepast.

Geval	V_{as} m/s	N_{rotor} rpm	SRF_{extreem}	D	SRF_{vermoei}	L_{bout} jr
1109	9	20	0.86(0.73)	0.84	1.2	60
1108	8	17.78	0.94(0.79)	0.73	1.37	68
1107	7	15.56	0.98(0.85)	0.69	1.46	73
1106	6	13.0	1.00(0.91)	0.21	4.87	>100

Tabel 9 Overzicht spanningsreserves en levensduur hoekbout M20 in flens 330x280 (tussen haakjes bij remmen)

Geval 7 m/s is een mooi vermoeiingsgeval. Het rotortoerental is ongeveer 60 einden (1 per seconde). Bij 8 a 9 m/s zou de molenaar zeil moeten minderen en moet de molen dus gestopt worden. De spanningsreserve voor de hoekbout is echter onvoldoende. Het remmen met de vang voegt nog 13.4 kNm aan M_{xx} toe wat resulteert in een verdere verlaging van SRF_{extreem} (getallen tussen haakjes).

6.5 Kleine molen maximale middenzwaarte

De molen heeft alle uitgangspunten het zelfde met uitzondering van:

Profielkarakteristiek is volgens lijn b ipv. volgens lijn a, dit zijn molens waar een of andere verbeterde neus op het profiel wordt toegepast. Er is daardoor enige toename in prestatie (zie Bijlage Profieleigenschappen en Berekening prestatie curven).

Rapport berekening molenroede, een verificatie van uitgangspunten.	pagina 29 van 57
--	------------------

De roeden en de flens zijn volgens de maximale middenzwaarte, dus 380x340, wanddikte 8 mm, 18 x M20. De roede is lichter dan die voor de molen met minimale middenzwaarte. Dat is verklaarbaar: het weerstandsmoment voor een dunwandige buis is evenredig met D^2t . Voor gelijkblijvende sterkte moet bij toename van de diameter met een factor 2 de wanddikte dus met een factor 4 afnemen. De massa is evenredig met Dt en neemt dus $2/4=0.5$ keer af.

De uitkomsten voor 13 m/s:

Omschrijving	lijn a 25 rpm	Lijn b 25 rpm	lijn a 35 rpm	Lijn b 35 rpm	
Fxfix N	38077(avg)	40755(avg)	39084(avg)	43067(avg)	incl. massa
Mxfix Nm	38209(avg)	45172(avg)	9933(avg)	15906(avg)	
Mx1 totaal	41375	42265	34898	35582	incl. massa
My1 Nm totaal	70106	75705	88043	92663	incl. massa
Mz1 Nm	3878(max)	4583	1181(max)	4753	
Fz1 N	36139	36598	59758	58760	centrif.+ gravity.
SRF _{extreem}	0.73(0.65)	1.01(0.99)		0.99(0.96)	
gF (belastingfactor)		1		1	

Tabel 10 Berekende extreme belastingen (SRF voor remmen tussen haakjes)

De hogere rotorperformance (lift) doet de windbelastingen toenemen.

De vermoeiingsbelastingen voor 9 m/s zijn:

Omschrijving	Lijn a 9 m/s en 20 rpm	Lijn b 9 m/s en 20 rpm	Lijn b 8 m/s en 17.8 rpm	Lijn b 7 m/s en 15.6 rpm
Fxfix	26669(avg)	26547(avg)	23621(avg)	21047(avg)
Mxfix	13933(avg)	16250(avg)	12942(avg)	9947(avg)
Mx1 totaal	37290	33778	37438	37165
My1 Nm totaal	39510	41950	34618	28461
Mz1 Nm	-1150	1462	1118	891
Fz1 N	24770	24930	21243	18057
gF	1	1	1	1

Tabel 11 Berekende vermoeiingsbelastingen lijn b 7, 8 en 9 m/s, vergeleken met lijn a 9 m/s

6.6 Flens maximale middenzwaarte vlucht 22 m

De flensafmetingen zijn 380x340 mm (zie Bijlage Flensafmetingen).

Voor de flensverbinding zijn de levensduren uitgerekend als voor de eerdere roede met minimale middenzwaarte.

Geval	V_{as} m/s	N_{rotor} rpm	SRF _{extreem}	D	SRF _{vermoei}	L_{bout} jr
1109	9	20	1.03(1.00)	0.98	1.02	51
1108	8	17.78	1.08(1.04)	0.19	5.3	>100
1107	7	15.56	1.10(1.06)	0	>>1	>100

	Rapport berekening molenroede, een verificatie van uitgangspunten.	pagina 30 van 57
--	--	------------------

Tabel 12 Overzicht spanningsreserves en levensduur hoekbout M20 in flens 380x340 (tussen haakjes met remmen)

De SRF voor vermoeiing is net genoeg voor geval 9. Een alternatieve ronde flens met dezelfde diameter als de breedte van de rechthoekige laat zien:

Het moment M is het resulterende moment $WORTEL(M_{xx}^2 + M_{yy}^2)$ van het 9 m/s geval op 20 rpm.

ronde ingeschreven flens

D=340-8	0.332	m
M	49503	Nm
F	21130	N
$4M/(\pi D^2) + F/(\pi D)$	1034096	N/m
$(a+b)/a$	2.0	-
n_ aantal bouten	26	-
$\pi * D / n_ \text{boutsteek}$	0.040	m
steek/diam	2.01	- OK
Z_	41.5	kN
$\delta \sigma_ \text{bout_Schmidt-Neuper}$	28.2	N/mm ²
$\sigma_ \text{voorspan}$	694.5	N/mm ²
$\sigma_ \text{totaal}$	722.7	N/mm ²
gF	1.35	
gM	1.1	
SRF_ext geval 8 m/s	1.13	

Tabel 13 Berekening spanningsreserve in ronde ingeschreven flens met 26xM20

De SRF in de bout is voldoende volgens de Schmidt-Neuper trilineaire berekening van de boutspanning. Het kan zijn dat de flens kiert, maar daarmee wordt in deze benaderingswijze rekening gehouden. Het frequent belasten op kieren van de flensverbinding is echter niet toegestaan. Om deze reden wordt de in de flens aanwezige buigspanning gecontroleerd volgens faaltoestand D als beschreven in ref. 6.

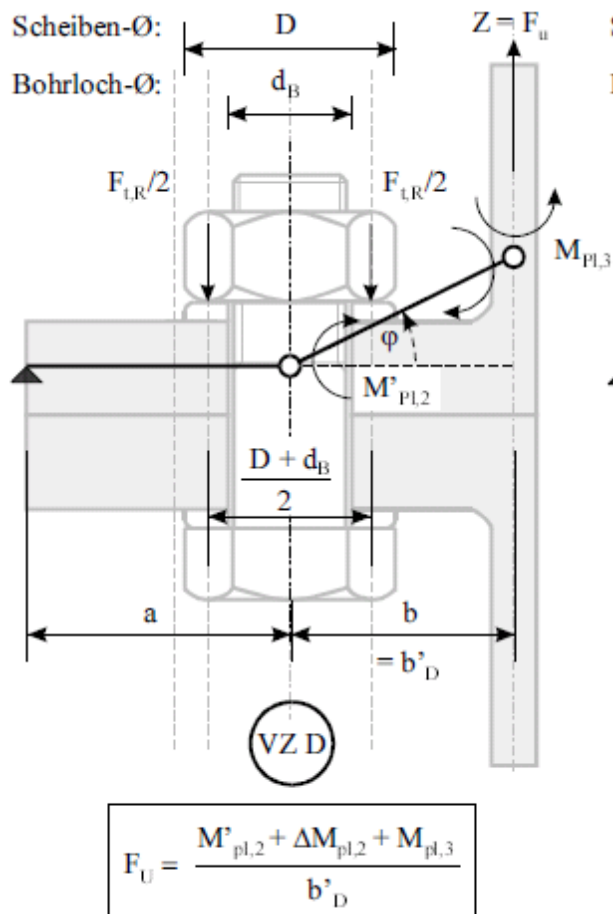
buigspanning flens 9 m/s (geen SCF)

t mm	20
breedte min boutgat mm	18.1
W_b mm ³	1208
b_D mm	32
M_b Nmm	1327473
$\sigma_ \text{b}$ Mpa	1099
rekgrens Mpa	355
SRF	0.294

Tabel 14 Berekening buigspanningsreserve in flens (gF=1.35)

De flensdikte t=20 mm is onvoldoende voor het maximum moment van het 9 m/s vermoeiingsgeval. Dit is in sterkere mate het geval voor het extreme geval van 13 m/s. Hoewel het hier een andere flensvorm betreft is het waarschijnlijk dat deze faaltoestand ook bij een rechthoekige flens op zal

treden. Het gat waar de bout doorheen loopt veroorzaakt spanningsconcentratie maar dat is hier niet in rekening gebracht omdat de spanningspieken wegvloeien.



Figuur 15 Faaltoestand bij te dunne flens

buigspanning flens 13 m/s (geen SCF)	
t mm	20
breedte min boutgat mm	18.1
W_b mm ³	2396
b_D mm	32
M_b Nmm	1140303
σ_b Mpa	944
rekgrens Mpa	355
SRF	0.34

Tabel 15 Berekening buigspanningsreserve in flens bij 13 m/s (gF=1.1)

De flensdikte is als voorgeschreven in Fig. 8.16 van de vernieuwde richtlijn is 25 mm, echter dat is hier niet genoeg om vloeien te voorkomen.

buigspanning flens 13 m/s (geen SCF)

	Rapport berekening molenroede, een verificatie van uitgangspunten.	pagina 32 van 57
--	--	------------------

t mm	35
breedte min boutgat mm	18.1
W_b mm ³	3699
b_D mm	32
M_b Nmm	1140303
σ_b Mpa	308
rekgrens Mpa	355
SRF	1.05

Tabel 16 Berekening buigspanningsreserve in dikkere flens bij 13 m/s (gF=1.1)

De flens heeft voldoende reserve bij een dikte van 35 mm. Dat is waarschijnlijk voldoende om een permanent goed functionerende verbinding te realiseren. Controle met FEM is echter wenselijk.

vermoeiing 8 m/s

Z_	39454.4	N	piekwaarde 8 m/s
$\delta\sigma_{\text{bout_Petersen_polynoom}}$	29.9	N/mm ²	exponent 5 toepassen
D	0.893	OK	
frequency 8 m/s	8.35E+06		
$\delta\sigma_{\text{bout_Schmidt-Neuper}}$	27.4	N/mm ²	exponent 5 toepassen
D	0.380	OK	

Tabel 17 Berekening vermoeïngsreserve van de bouten in de ronde flens bij 8 m/s

De wandkracht is berekend uit een boutsteek horend bij 26 bouten, zoals ook toegepast wordt bij de rechthoekige flens. Dit toont aan dat de ronde flens ontwerptechnisch te prefereren is boven het klassieke rechthoekige alternatief. Het is natuurlijk de vraag in hoeverre dit te realiseren is.

6.7 Grote molen maximale middenzwaarte

De molen heeft een vlucht van 29 m:

Profielkarakteristiek is volgens lijn b ipv. volgens lijn a, dit zijn molens waar een of andere verbeterde neus op het profiel wordt toegepast. Er is daardoor enige toename in prestatie (zie Bijlage Profieleigenschappen en Prestatieberekening).

De roeden en de flens zijn volgens de maximale middenzwaarte, dus 410x380, wanddikte 20 mm, 22 x M24.

De uitkomsten voor 13 m/s:

Omschrijving	Lijn b 25 rpm	Lijn b 35 rpm	
Fxfix N	53656(avg)	56750(avg)	incl. massa
Mxfix Nm	60707(avg)	0 (avg)	
Mx1 totaal	75645	58933	incl. massa
My1 Nm totaal	112667	188780	incl. massa
Mz1 Nm	-6471	-7218	
Fz1 N	57505	99998	centrif.+ gravity.

Tabel 18 Berekende extreme belastingen

De grotere rotorvlucht doet de windbelastingen toenemen.

De vermoeiingsbelastingen voor 6, 7, 8 en 9 m/s zijn:

Omschrijving	Lijn b 9 m/s en 20 rpm	Lijn b 8 m/s en 17.8 rpm	Lijn b 7 m/s en 15.6 rpm	Lijn b 6 m/s en 13.0 rpm
Fxfix	35664(avg)	31512(avg)	28230(avg)	25160
Mxfix	17562(avg)	16807(avg)	12674(avg)	8839
Mx1 totaal	65219	65092	64676	64138
My1 Nm totaal	78038	62062	51182	41913
Mz1 Nm	-3450	-2929	-3233	-3212
Fz1 N	41476	33196	28451	24269
gF	1	1	1	1

Tabel 19 Berekende vermoeiingsbelastingen 29 m vlucht lijn b 6, 7, 8 en 9 m/s

Rapport berekening molenroede, een verificatie van uitgangspunten.	pagina 34 van 57
--	------------------

6.8 Flens maximale middenwaarte vlucht 29 m

De flensafmetingen zijn 410x360 mm (zie Bijlage Flensafmetingen).

Voor de flensverbinding zijn de levensduren uitgerekend als voor de eerdere roedes met vlucht 22 m.

Daarbij is een boutkracht/boutspanning tabel gegenereerd voor M24 en de flensafmeting volgens Bijlage Flensafmetingen.

Z_wall	F_bolt	S_bolt
-194.89009	217.7807	617.8132
0	250	709.2147
25	254.133	720.9394
25.01	254.1747	721.0577
97.445047	306.2559	868.8046
97.545047	306.5701	869.6962
194.890094	612.5117	1737.609

Tabel 20 Boutkracht/spanning volgens Schmidt-Neuper voor bout M24 en flens 410x360

Geval	V _{as} m/s	N _{rotor} rpm	SRF _{extreem}	D	SRF _{vermoei}	L _{bout} jr
1109	9	20	0.82(-)	62.5	0.016	0.8
1108	8	17.78	0.92(-)	56.7	0.018	0.9
1107	7	15.56	0.96(-)	48.1	0.021	1.1
1106	6	13.0	0.97(-)	42.4	0.024	1.2

Tabel 21 Overzicht spanningsreserves en levensduur hoekbout M24 in flens 410x360 (geen rem)

De SRF voor vermoeiing is teleurstellend voor alle gevallen. Dat wordt behalve door de eerder genoemde spanningsconcentratie tevens veroorzaakt door de hefboomverhouding die zo klein mogelijk moet zijn maar hier gelijk is aan 2.5. Een oorzaak hiervan is het constant houden van de flensbreedte. Deze kan beter toenemen met de buitenafmeting van de flens. Tevens helpt het de bout zo dicht mogelijk tegen de wand te situeren. Een ronde flens met dezelfde uitwendige diameter als de breedte van de rechthoekige maar met dezelfde hefboomverhouding laat zien:

ronde ingeschreven flens 13 m/s

D=360-20 (Dinw = 200)	0.340	m
M	135706	Nm
F	57505	N
$4M/(\pi D^2)+F/(\pi D)$	1703357	N/m
(a+b)/a	2.5	-
n_ aantal bouten	18	-
$\pi * D / n_ \text{boutsteek}$	0.045	m
steek/diam	1.86	NOT OK
Z_	76.1	kN
$\delta \sigma_ \text{bout_Schmidt-Neuper}$	117	N/mm ²
$\sigma_ \text{voorspan}$	708.2	N/mm ²
$\sigma_ \text{totaal}$	825.2	N/mm ²
gF	1.1	

	Rapport berekening molenroede, een verificatie van uitgangspunten.	pagina 35 van 57
--	--	------------------

gM 1.1
SRF_ext geval 13 m/s 1.0

Tabel 22 Berekening spanningsreserve in ronde ingeschreven flens met 18xM24 bij 13 m/s

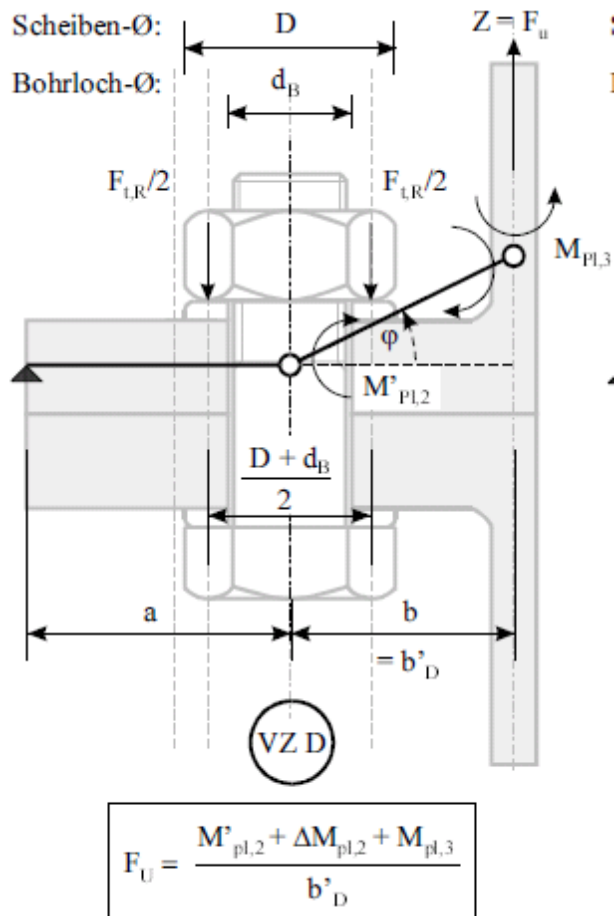
Het aantal bouten is gereduceerd tot 18. De SRF in de bout is voldoende volgens de Schmidt-Neuper trilineaire berekening van de boutspanning. Het kan zijn dat de flens kiert, maar daarmee wordt in deze benaderingswijze rekening gehouden. Het frequent belasten op kieren van de flensverbinding is echter niet toegestaan. Om deze reden wordt de in de flens aanwezige buigspanning gecontroleerd volgens faaltoestand D (zie Figuur 15 Faaltoestand bij te dunne flens) als beschreven in ref. 6.

buigspanning flens 13 m/s (geen SCF)

t mm	25
breedte min boutgat mm	18.7
W_b mm ³	1946
b_D mm	42
M_b Nmm	3196517
σ_b Mpa	1643
rekgrens Mpa	355
SRF	0.196

Tabel 23 Berekening buigspanningsreserve in flens (gF=1.1)

De flensdikte is als voorgeschreven in Fig. 8.16 van de vernieuwde richtlijn is 25 mm, echter dat is hier niet genoeg om vloeien te voorkomen. Hoewel het hier een andere flensvorm betreft is het waarschijnlijk dat deze faaltoestand ook bij een rechthoekige flens op zal treden. Het gat waar de bout doorheen loopt veroorzaakt spanningsconcentratie maar dat is hier niet in rekening gebracht omdat de spanningspieken wegvloeien.



Figuur 16 Faaltoestand bij te dunne flens

buigspanning flens 13 m/s (geen SCF)

t mm	58
breedte min boutgat mm	18.7
W_b mm ³	10473
b_D mm	42
M_b Nmm	3196517
σ_b Mpa	305
rekgrens Mpa	345
SRF	1.03

Tabel 24 Berekening buigspanningsreserve in dikkere flens bij 13 m/s (gF=1.1)

De flens heeft voldoende reserve bij een dikte van 58 mm. Dat is dan ook voldoende om een permanent goed functionerende verbinding te realiseren. Controle met FEM is echter wenselijk.

vermoeiing met extreme belastingen 9 m/s				
e_M		0.541	N/Nm	
e_F		0.046	N/N	
Z_		56963.2	N	
$\delta\sigma_{\text{bout_Petersen_poly}}$		44.4	N/mm ²	exponent 3
D		0.175	OK	
frequency		5.00E+05		
$\delta\sigma_{\text{bout_Schmidt-Neup}}$		77.9	N/mm ²	exponent 3
D		0.946	OK	

Tabel 25 Berekening vermoeiingsreserve van de bouten in de ronde flens bij 8 m/s

Dit toont aan dat de ronde flens ontwerptechnisch te prefereren is boven het klassieke rechthoekige alternatief. Het is natuurlijk de vraag in hoeverre dit te realiseren is.

7 Technische conclusies

- De flensberekeningen laten bij hoge uitwendige belasting allemaal flenskanteling zien, beginnend op de hoek. Deze kanteling heeft meer of minder ernstige spanningsverhoging in de bout tot gevolg die kan leiden tot vroegtijdig bezwijken.
- De indeling in minimale middenzwaarte en maximale middenzwaarte is wel effectief voor de roede, maar voor de flensverbinding zijn er tegengesteld werkende effecten, zoals het constant houden van de flensbreedte voor alle ontwerpen.
- Het gat in de roede voor het aanhalen van de bouten zit te dicht bij de flens. Een deel van de bouten functioneert daardoor minder hetgeen de toch reeds aanwezige spanningsconcentratie rond de hoekbouten verergert. Het verschuiven van deze gaten naar buiten de askop is aan te raden.
- Voor de grote molens is de levensduur onvoldoende gegarandeerd, ook volgens de configuratie volgens de richtlijn van 2016. In de tabel zit nog een fout: het aantal bouten voor de maximale zwaarte klopt niet.
- De berekening van de rotorbelastingen volgens ref. 1 is goed voor de extreme gevallen in de roede, maar het vermoeiingsspectrum is onvoldoende voor molens met een zwaar werkregiem.
- De berekening van het vangkoppel volgens ref. 1 is fout.

8 Technische aanbevelingen

- Het systeem van een tabel van roede- en flensontwerpen waarmee een nieuw ontwerp gedimensioneerd kan worden ontbeert de invloed van het werkregiem.
- De indeling in minimale middenzwaarte en maximale middenzwaarte is wel effectief voor de roede maar voor de flensverbinding zijn er tegengesteld werkende effecten, zoals het constant houden van de flensbreedte voor alle ontwerpen. De flensbreedte dient meegeschaald te worden met de hoogte en de breedte en de bout moet zo dicht mogelijk tegen de wand gepositioneerd worden om het hefboomeffect dat kanteling versterkt te minimaliseren.

3. Bij de bestaande ontwerpen kan het geven van een tegenkanteling bij de fabricage helpen. De flens wordt dan elastisch voorgespannen en het moment van kieren wordt verplaatst naar een hogere uitwendige belasting. Bij flensontwerpen van torens voor moderne electriciteit producerende windturbines wordt dit standaard toegepast. Voorwaarde is dat de belastingen niet zo hoog zijn dat er toch weer kieren optreedt.
4. Als de bouten een onvoldoende levensduur hebben in een bestaand ontwerp kunnen langere bouten met een dikwandige bus toegepast worden. Daarmee wordt de flexibiliteit van de bout relatief groter en geven lengteveranderingen veroorzaakt door de door te leiden uitwendige belasting dus een lagere spanningswisseling in de bout. Een taillering van de bout versterkt dit effect nog. De bus moet zo dikwandig mogelijk zijn, dus bijv. even dik als de ring onder de moer breed is. Voor elk ontwerp moet dit individueel bekeken worden. Om te voorkomen dat de bout meedraait bij het aanhalen van de moer kan een borgplaat op de boutkop toegepast worden.
5. Als bouten een onvoldoende sterkte hebben op extreme spanning kunnen bouten in de kwaliteit 12.9 toegepast worden. Een nadeel is dat deze niet geconserveerd zijn.
6. Een frictieverbinding met hoogwaardige voorgespannen bouten heeft een veel langere levensduur (categorie 90 volgens EC-3). De bouten ondervinden hoegenaamd geen spanningswisseling. Voor de dimensionering op extreme spanning is het aanbrengen van een extra boutenrij eenvoudig te realiseren, zelfs achteraf. De lokatie voor een dergelijke verbinding zit excentrisch, is gemakkelijker bereikbaar en is dientengevolge beter te inspecteren. (zie14 Bijlage overlapverbinding). De verbinding kan afgekit worden waardoor hoegenaamd geen vocht meer kan toetreden tot het inwendige van de verbinding. Om de verbinding en de tegenoverliggende balanceergewichten aan het zicht te onttrekken kunnen eenvoudige kunststof kappen toegepast worden.
7. Een excentrisch gepositioneerde verbinding vereist twee verschillende roedelengtes. Als de lange roede te lang is voor het zinkbad kan deze evenlang als de korte gemaakt worden en kan er een los tussenstuk gemaakt worden van bijv. twee meter lang met aan beide kanten een boutverbinding. Balanceren is dan niet meer nodig.

9 Organisatorische aanbevelingen

Bij energieproducerende windturbines is een certificaat nodig om de molen als producent te kunnen verkopen en er mee in aanmerking te kunnen komen voor subsidieregelingen. Het certificaat zorgt voor een technische klassificatie in termen van een windregiem, waarin het turbine ontwerp probleemloos kan produceren gedurende de geplande technische levensduur. Of dat het geval is moet de producent van de molen bewijzen door het overleggen van ontwerpdocumentatie en door het doen van een meting waarin de energieproductie en een aantal milieueigenschappen (geluid, EMC) door meting aangetoond moeten worden. Ook moet de turbine op een veilige wijze bedreven en onderhouden kunnen worden.

Een dergelijk systeem heeft veel voordelen maar is tevens erg kostbaar. Voor Oud-Hollandse molens zou een certificaat geen luxe zijn, maar het moet niet de eigenaren voor een onmogelijke opgave

	Rapport berekening molenroede, een verificatie van uitgangspunten.	pagina 39 van 57
--	--	------------------

stellen (vaak stichtingen die van giften etc. rond moeten zien te komen). Er zou een instantie in het leven geroepen kunnen worden die bij een inspectie vastlegt:

8. Registratie van de eigendomsrechten (voor zover dat niet reeds bestaat) en omschrijven wat de eigenaar met de molen beoogt.
9. Het gebruiksregiem omschrijft in termen van draaiuren en gebruik van de molen als werktuig. Dat regiem kan periodiek opgedateerd worden, met het doel te controleren of er geen wijzigingen in optreden die gevaar op kunnen leveren.
10. Een omschrijving geeft van de technische staat van de molen. Dat betreft een klassificering in termen van vlucht, gebouw, aanwezige werktuigen (dus wat staat er) en een beschrijving van de toestand waarin het verkeert.
11. Een soort van toetsing of aan een aantal eisen die voortkomen uit wat als verstandig gebruik omschreven zou kunnen worden, voldaan is. Daarbij wordt een molen ingedeeld in een klasse die een gebruiksregiem en een windregiem vastlegt. Daaruit worden belastingen berekend waaraan de molen onderworpen kan worden in het geplande gebruiksregiem. Deze belastingen moeten aantoonbaar verdragen kunnen worden. Als dat niet het geval is moet een advies geproduceerd worden waarvan de opvolging of niet opvolging tot een herziening van het inspectieresultaat kunnen leiden. Als het wel het geval is kan een goedkeur afgegeven worden.
12. Het rapport heeft een beperkte geldigheidsduur. Dit opnieuw om te voorkomen dat de staat waarin het erfgoed verkeert verloedert en waarin het keuringsrapport misbruikt kan worden om een gevaar opleverend werktuig in gebruik te houden.
13. De wijze waarop de molen bij harde wind geregeld is en indien nodig gestopt wordt, moet omschreven worden. Bij het berekenen van de extreme belastingen moet hiermee rekening gehouden worden.
14. Er wordt aanbevolen als proef een op de IEC windenergienorm gebaseerd belastingsspectrum te laten maken voor een molen met een bedrijfsregiem. Dit belastingsspectrum kan dan gebruikt worden voor de controle van zowel de roede als de flensverbinding van een bestaand molenontwerp.

	Rapport berekening molenroede, een verificatie van uitgangspunten.	pagina 40 van 57
--	--	------------------

10 Referentielijst

- 1 **Berekening Molenroede** – herzien en gewijzigd exemplaar november 1983
- 2 **Richtlijnen voor de vervaardiging van stalen molenroeden** 1985 van de Rijksdienst voor de Monumentenzorg te Zeist
- 3 **Richtlijnen voor het vervaardigen van stalen molenroeden - december 2011.** Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed. Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschappen
- 4 **Het Prinsenmolenboek.** Een onderzoek naar het vermogen van windmolens. H. Veenman, Wageningen 1942.
- 5 **VDI-2230** Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Zylindrische Einschraubenverbindungen 2003
- 6 **Berechnung großer Flanschverbindungen von Windenergieanlagen.** Dipl.-Ing. P. Dalhoff, Dipl.-Ing. A. Dombrowski und Dr.-Ing. D. Lehmann, Hamburg
- 7 **NEN-EN 1993-1-9 2006 Eurocode 3** - Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 1-9
- 8 **Windmolens. Richtlijnen voor het vervaardigen van stalen molenroeden.** Uitgave 2016. Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed. Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschappen
- 9 **Design verification.Toelichting op richtlijn 2016.** Stemar Alkmaar
- 10 **Design verification. Aanpassingen delingsflens.** Stemar Alkmaar
- 11 **IEC 61400-1{ed3.0}en Wind turbine-Part1 Design requirements**

11 Bijlage Berekening vangkoppel in een wiek en in de as

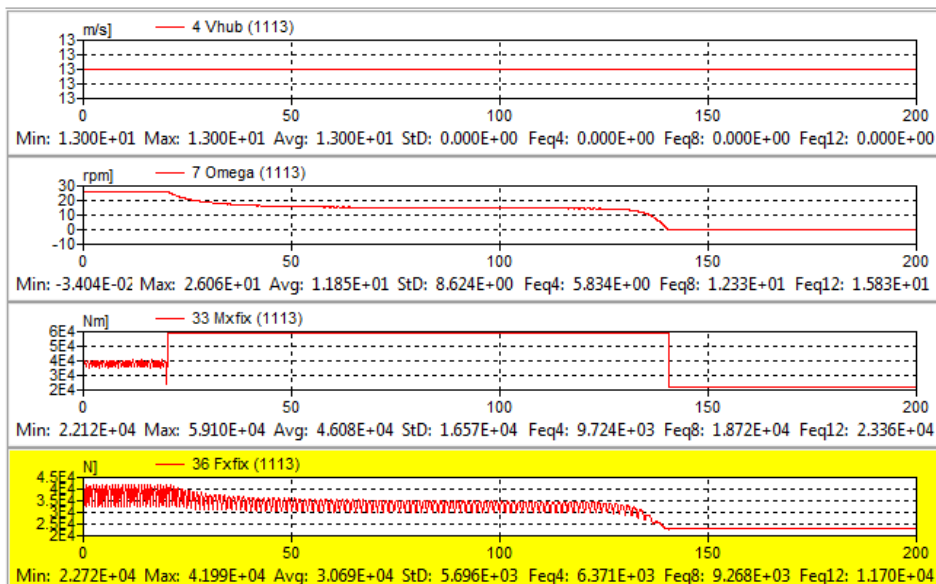
Hierbij een remkoppel uitgerekend in de as van 53649 Nm (met bijdrage van 4 wieken, zie ref. 1 p. 32). Het massastraagheidsmoment van één wiek is niet gelijk aan $m \cdot r_z^2$, maar aan $\int r_i^2 \cdot dm_i$.

Uitgerekend is het moment nodig om de molen vanaf 100 einden in één omwenteling te stoppen (geen wind). Dat geeft een benodigd asmoment 53649 Nm. Het asmoment werd al te hoog geacht, dat is nu dus aanzienlijk meer het geval.

Ber. 25 rpm				stel remhoek as gelijk aan 1 omw:	
n_rotor	25	rpm	remhoek as	6.28	rad
omega_rotor	2.62	rad/s	t_rem	4.8	s
Mxfix	38209	Nm	remvertraging	-0.55	rad/s ²
m_wiek	836.8	kg	M_vang	53649	Nm
Wiek statisch moment	3769.6	kg*m	Mxfix+M_vang	91858.24	Nm
Mx1 zwaartekracht (excl tilt)	36979.9	Nm	tau as	29.94	Mpa
Mx1 zwaartekracht (incl tilt)	35881.4	Nm	SRF	0.67	-
My1 zwaartekracht (incl tilt)	8946.2	Nm	id. ref. 1	0.47	-
J massastraagh.mom. één wiek	24591	kgm ²	Mx1_rem	13412	Nm
J massastraagh.mom. 4 wieken	98364	kgm ²	Mx1 totaal	54786	Nm
M_vang	= J*(omega_rotor/2)^2/(remhoek as)		Nm	id. ref. 1	70099 Nm

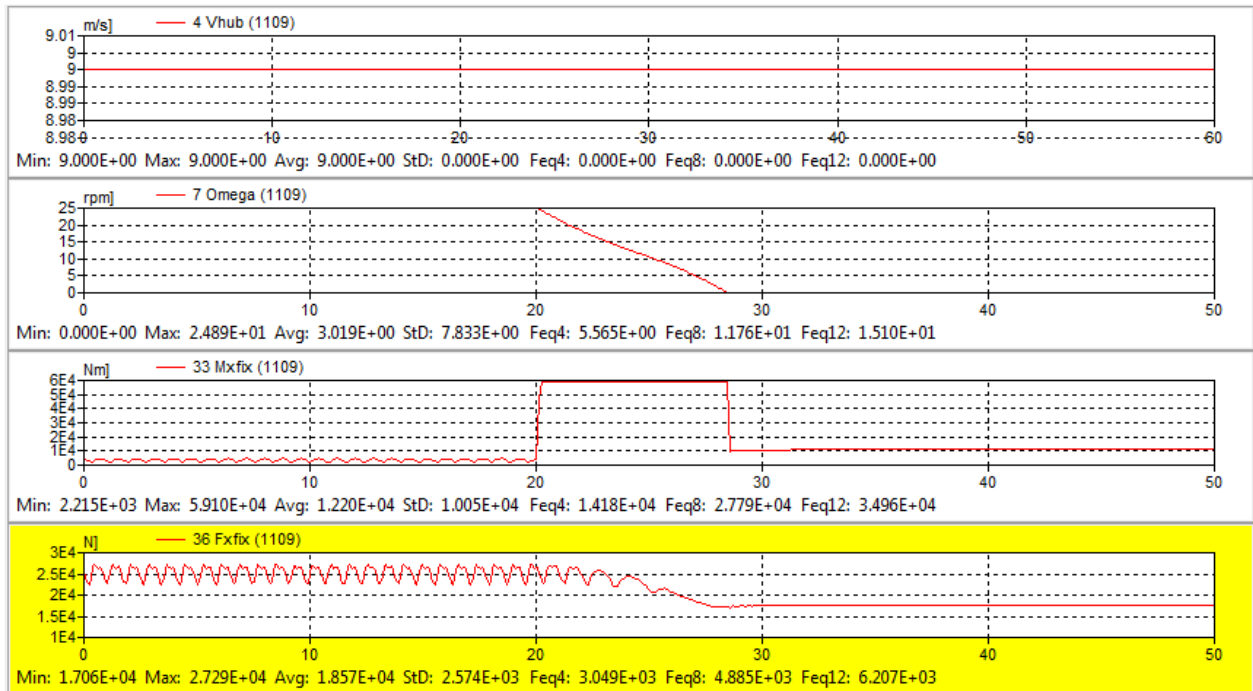
Tabel 26 Berekening vangkoppel M_vang en stop bij 13 m/s en 25 rpm.

Het askoppel M_vang gedeeld door 4 is het moment in de roede Mx1_rem dat opgeteld moet worden bij de tangentiale momenten tgv. wind en zwaartekracht.



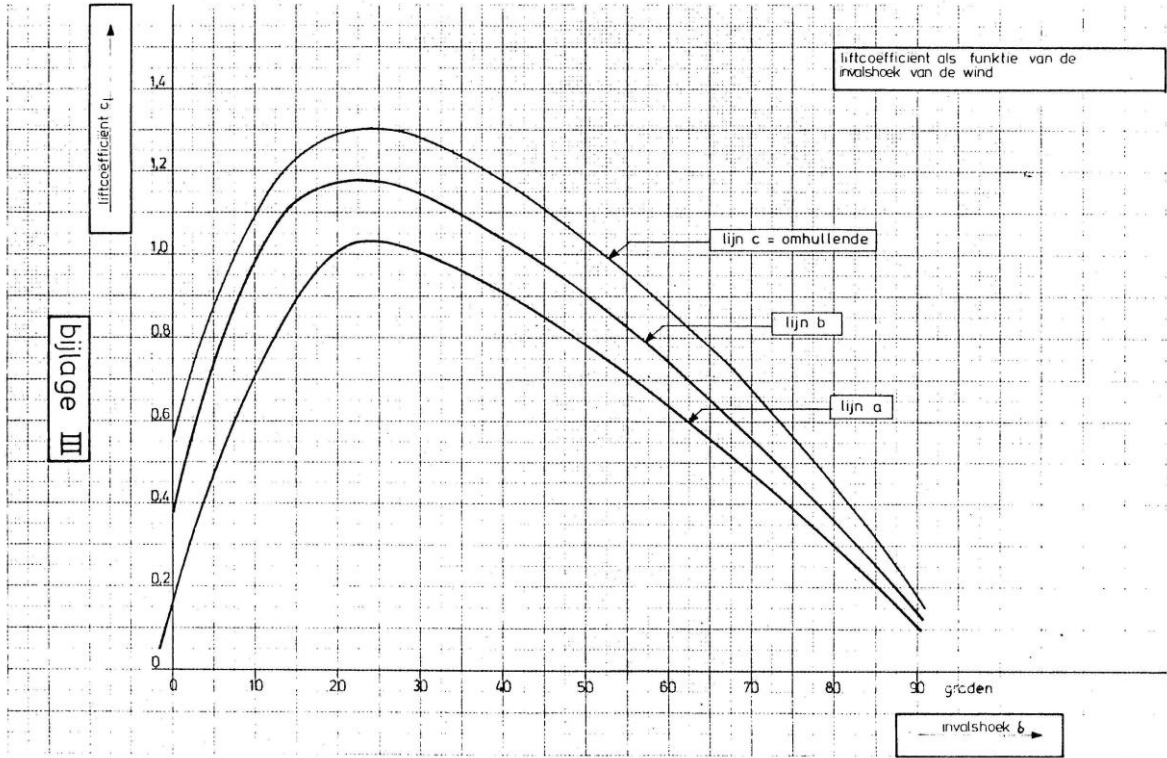
Figuur 17 Berekening geval remmen bij 13 m/s met vangkoppel volgens berekening in tabel 18.

Het askoppel is 59 kNm gedurende 120 s. De rotorhoeksnelheid is ongeveer 1.5 rad/s gedurende het remmen. Het geleverde vermogen is dus $1.5 \cdot 60 = 90$ kW. De in warmte omgezette energie bedraagt $120/3600 \cdot 90 = 3$ kWh. Dat is dus evenveel als een CV ketel van 12 kW die een kwartier voluit staat te branden. In het onderstaande geval wordt met hetzelfde vangkoppel bij 9 m/s gestopt binnen 9 s. Het gedissipeerde vermogen bedraagt hier 0.2 kWh.

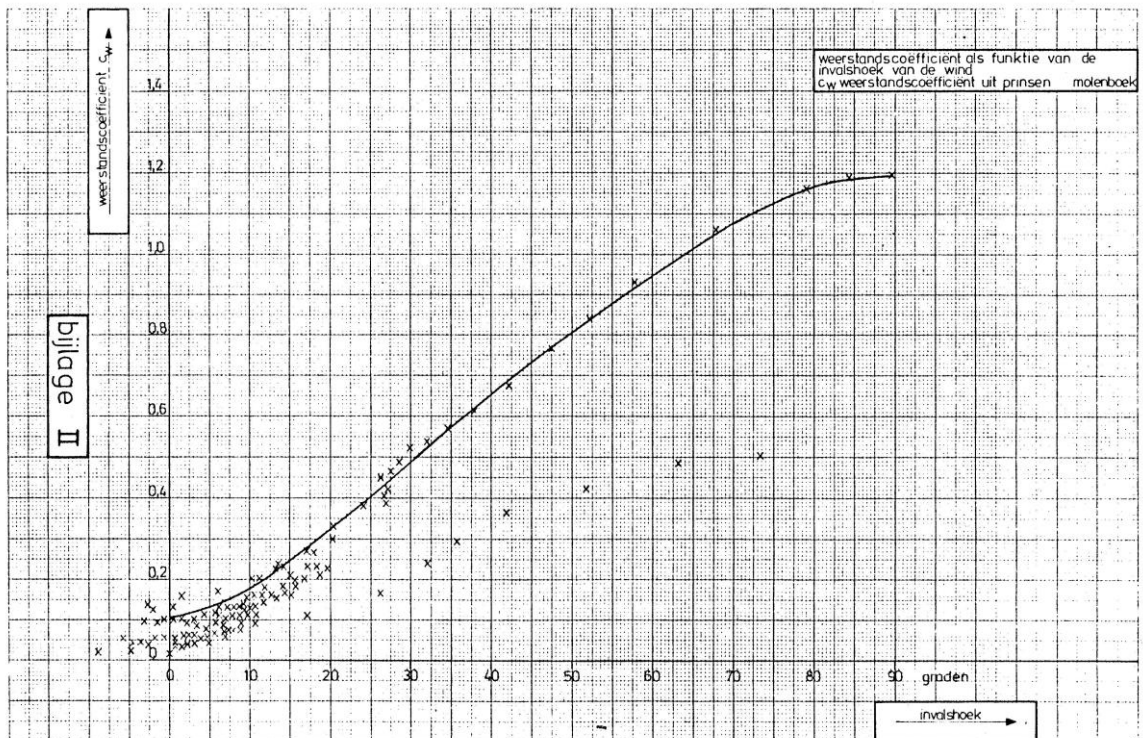


Figuur 18 Berekening geval remmen bij 9 m/s met vangkoppel als in fig. 14.

12 Bijlage Profieleigenschappen



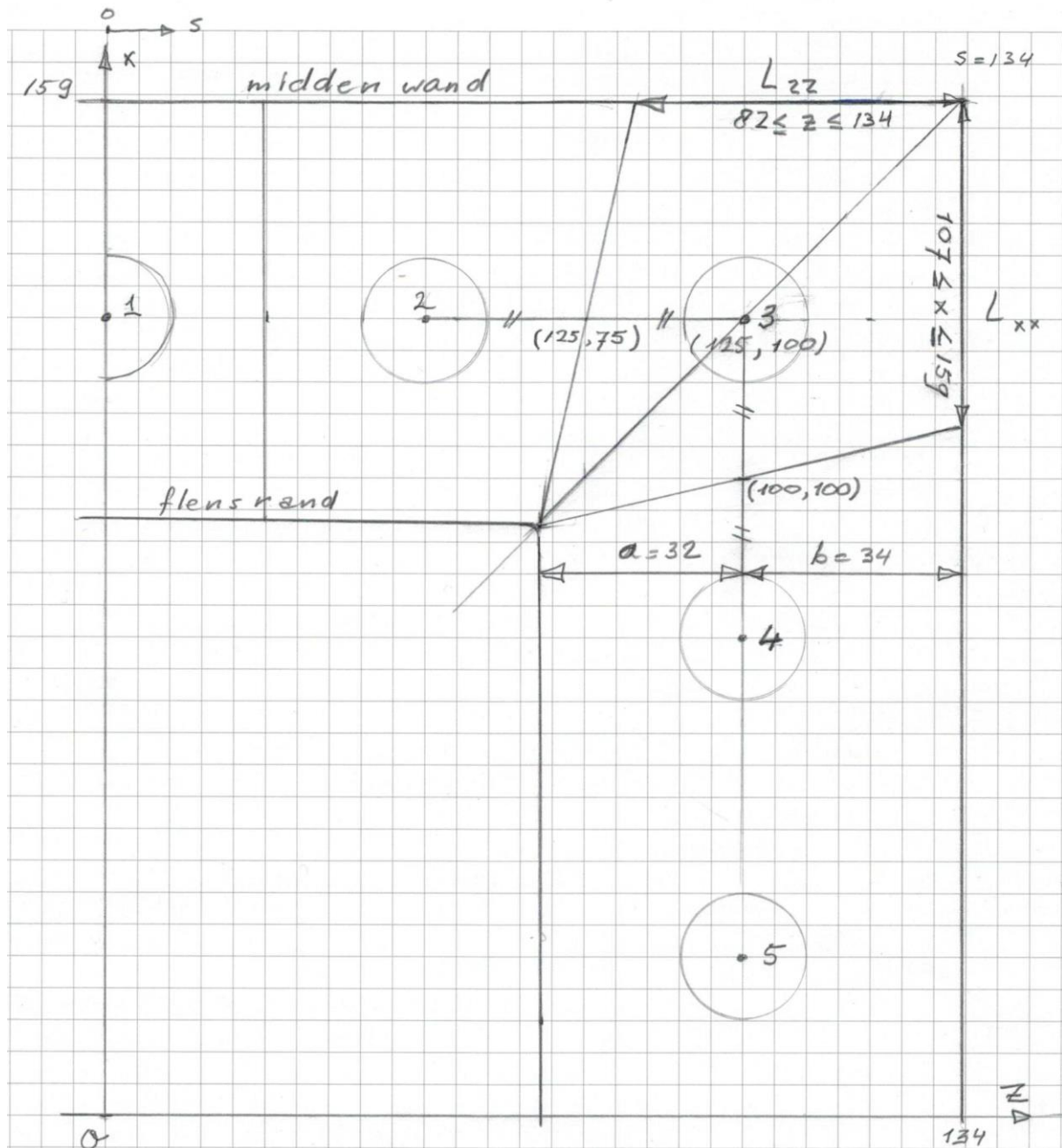
6



13 Bijlage Flensafmetingen

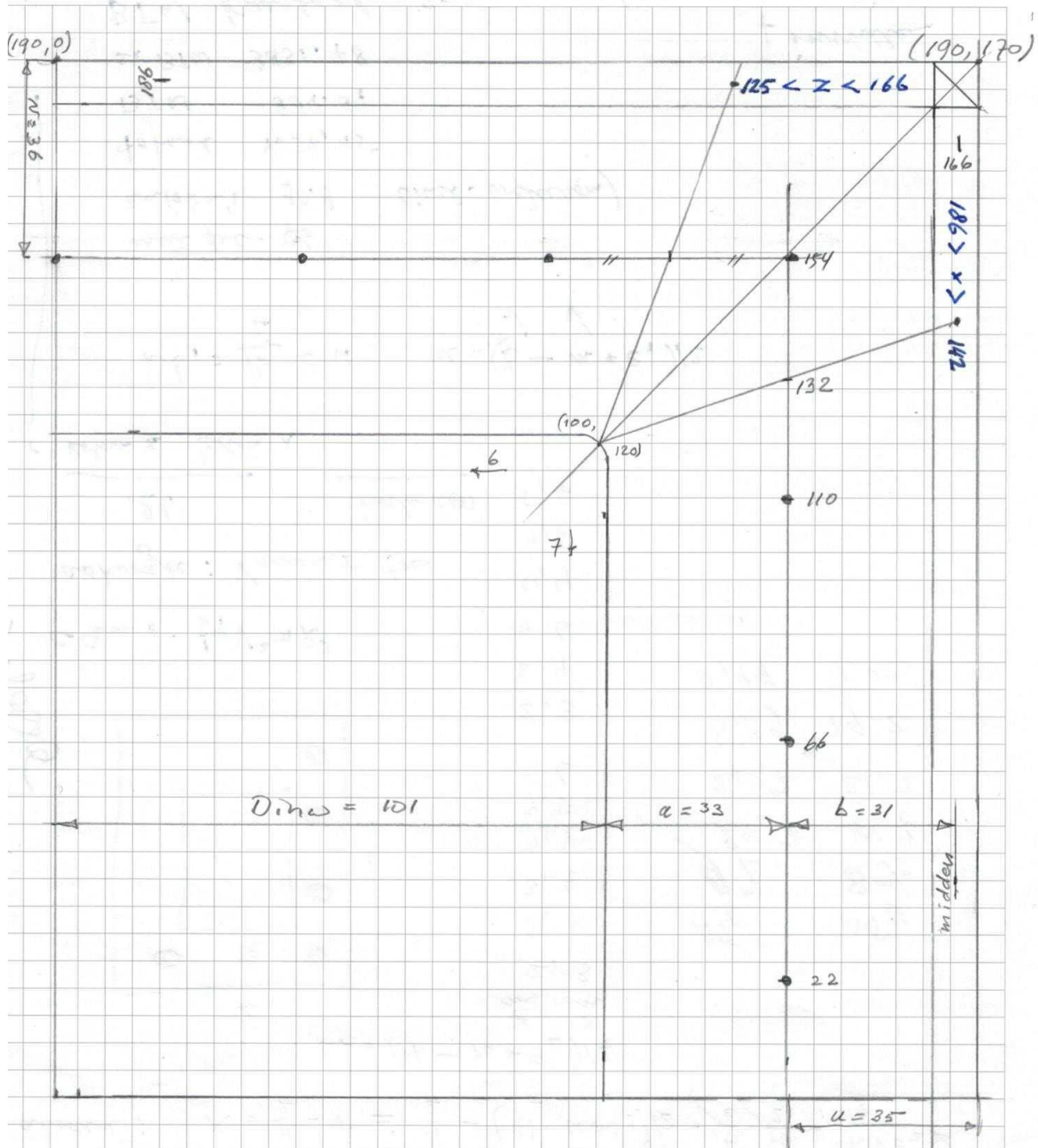
Flens minimale middenzwaarte voor vlucht 22 m, afm. 330x280.

Er is een kwart van de flens getekend, zichtbaar zijn 5 van de 18 boutlocaties. Het vliegvormige gebied rond boutlocatie 3 is het invloedsgebied van de hoekbout. Deze wordt belast door de lijnbelasting L_{zz} en L_{xx} langs de aangegeven delen van de omtrek. De omtrek wordt gemeten op de middens van de plaatwand van de roede. Daarom is de afstand $a+b=60+12/2 = 66\text{mm}$.

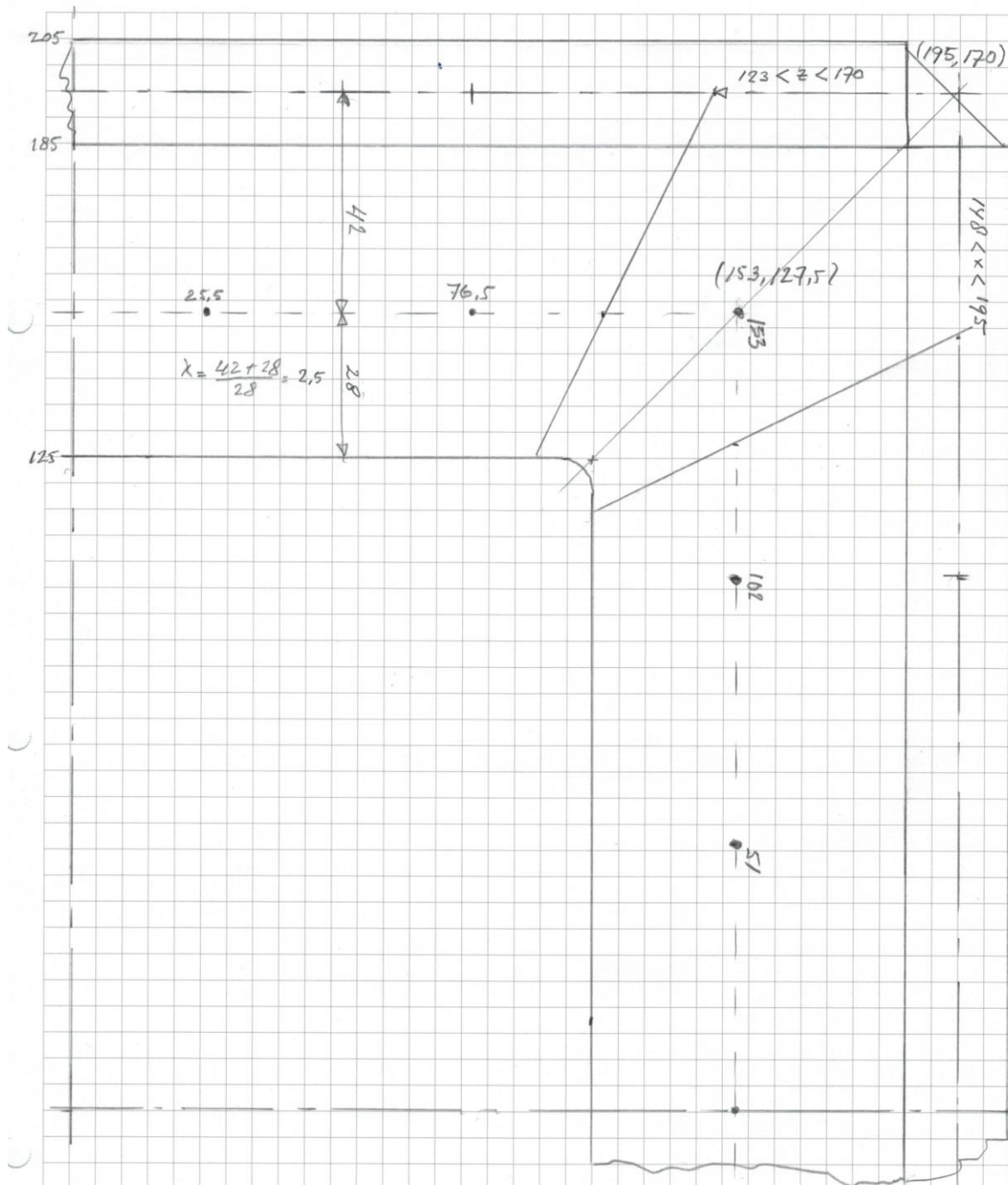


Flens maximale middenzwaarte voor vlucht 22 m, afm. 380x340.

Zie ok de opmerking bij de tabel. Daarin waren enkele boutposities niet correct. In de versie 2016 stonden de hier gebruikte die wel goed zijn.



Flens maximale middenzwaarte voor vlucht 29 m, afm. 410x360.



14 Bijlage Overlapverbinding

Als alternatieve verbinding wordt een frictieverbinding met overlappende strippen voorgesteld. Dit type verbinding wordt veel toegepast in de staalbouw. De verbinding wordt uit de askop verschoven naar bijv. een straal van 1 m. De ene roede wordt daartoe met een meter verlengd, de ander ingekort. Er worden 4 overlappende strippen op de stuiknaad geschroefd die via wrijving de krachten

	Rapport berekening molenroede, een verificatie van uitgangspunten.	pagina 47 van 57
--	--	------------------

doorgeven. De speciale kraagmoeren (volgens DIN 6331) worden aan de binnenkant in borgplaten in de roede opgehangen.

De montageprocedure is als volgt:

1. Steek de lange roede op de molen en bevestig deze als gebruikelijk in de askop.
2. Schroef twee overlapstrippen handvast op het uit de askop stekende eind.
3. Positioneer deze ene wiek horizontaal en zorg voor een stabiele ondersteuning met een schaar van twee balken op de stelling. De korte roede kan daarna in de kraan hangend, in de hoek van de twee reeds gemonteerde strippen gelegd worden.
4. Schroef de overblijvende twee strippen vast. Draag daarbij zorg voor een preciese uitlijning van beide roeden, bijv. met een over de verbinding reikende klemmende pasmal.
5. Haal alle bouten aan, op volgorde, met een precisie hydraulische momentsleutel.
6. Kit de naden af.
7. Monteer beschermkappen die de strippen met de boutkoppen en de balanceergewichten aan de andere kant aan het oog onttrekken en die aansluiten op de askop. Deze kappen, die aansluiten op de askop hebben tevens als functie afscherming tegen weersinvloeden.
8. Controleer de voorspanning op gezette tijden door steekproefsgewijs natrekken met 80% van het aanhaalmoment. Daarvoor worden twee van de 4 kappen verwijderd en na afloop weer teruggezet.

De berekening van deze verbinding is vergeleken met die van de flensverbinding van een verbluffende eenvoud. De vermoeiingsspanning wordt over de bruto doorsnede van de wand van de roede berekend (enkele lapnaad). De categorie volgens EC-3 is 90, hoger dus dan die van de lassen in de roede. Eigenlijk hoeft er dus al niet meer gerekend te worden. De extreme analyse is zo mogelijk nog probleemlozer. De spanning in het extreme geval wordt vermenigvuldigd met de boutsteek in dwarsrichting (die kan gewoon overgenomen worden van de flenstabel) en de wanddikte van de roede. Dat levert een kracht op. Als deze te groot is voor één rij bouten wordt er een rij bouten achter gezet, net zolang tot de kracht opgenomen kan worden door de gesommeerde wrijvingskracht onder de voorspanbouten op de zwaarst belaste rij in langsrichting van de roede. Dat is op de hoek waar de windbelasting en de massabelasting optellen tot de hoogste spanning. Als het daar goed gaat gaat het rond de hele omtrek van de roede goed.

De hoogste extreme belasting is hier de belasting bij 13 m/s en 35 rpm. De som hiervoor staat hieronder. De wrijvingscoëfficiënt in de verbinding is 0.2 wegens het verzinkt zijn van de delen. Dat hoeft niet, er kan ook gestraald en geschopeerd worden, waarmee een wrijvingscoëfficiënt van 0.5 gehaald kan worden maar dat is duurder en lijkt hier niet nodig. Er kan met 2 boutrijen M24 volstaan worden. Per strip komen er dus $4 \times m = 20$ of $4 \times n = 24$ bouten op te zitten, wat een totaal aantal van $2 \times (40 + 48) = 88$ bouten geeft.

bout	M24 10.9	
A_s	353	mm ²
A_k	324	mm ²
Fv	250000	N
σ_{wand}	78	Mpa
F_wand	79443	N
n_boutrij	2.00	-
F_toel	100000	N
gF	1.1	-
gM	1.1	-
SRF_ult	1.14	-

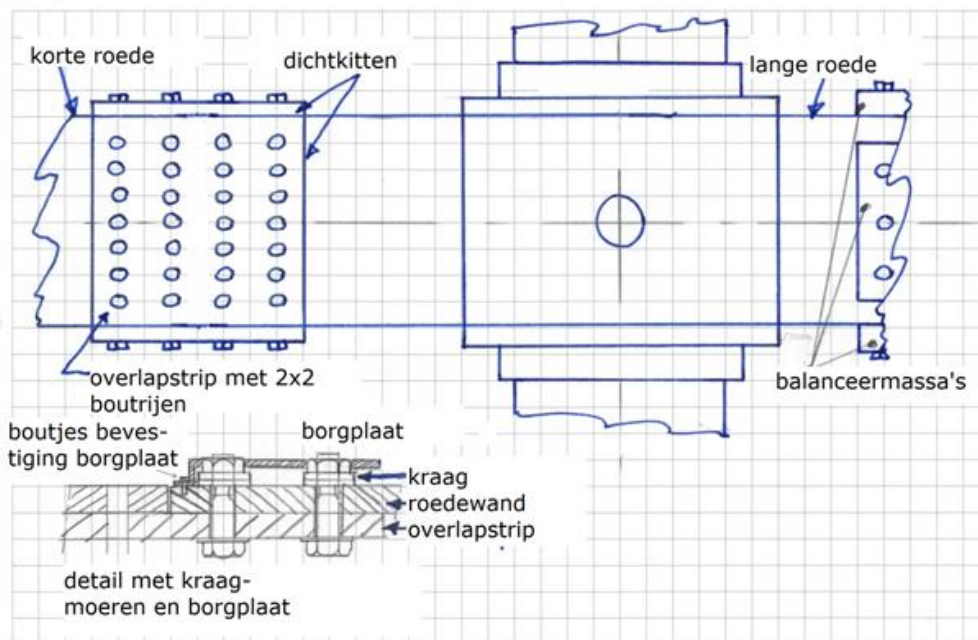
Tabel 27 Berekening extreme spanningsreserve van de frictieverbinding 13 m/s en 35 rpm.

Voor de vermoeïngsberekening worden eenheidsspanningen afgeleid door de spanning in de roedewand te berekenen met een kracht of moment van 1 N of Nm. Met die eenheidsspanningen wordt de spanning op de hoek gerainflowd en met de daarmee gevonden ranges wordt de vermoeïngsberekening gemaakt:

gM_fat		dSig_C	dSig_D	dSig_L	Rainflow	spectrum		
1.1		90	66.32	36.41	range	frequency	cum. freq.	
dSigE Mpa	>dSig_D?	Dami	<dSig_L?	m				
43.3	ONWAAR	0.2	ONWAAR	5	3.94E+01	8.05E+06	8.05E+06	
42.5	ONWAAR	0.028	ONWAAR	5	3.86E+01	1.31E+06	9.36E+06	
9.5	ONWAAR	0.000	WAAR	5	8.67E+00	2.34E+04	9.38E+06	
8.7	ONWAAR	0.000	WAAR	5	7.88E+00	4.68E+06	1.41E+07	
7.8	ONWAAR	0.000	WAAR	5	7.09E+00	4.68E+06	1.87E+07	
2.6	ONWAAR	0.000	WAAR	5	2.36E+00	9.17E+06	2.79E+07	
1.7	ONWAAR	0.000	WAAR	5	1.58E+00	1.87E+05	2.81E+07	
					0.00E+00	2.34E+04	2.81E+07	
SRF	4.543	Damage	0.22	227.1				

Tabel 28 Berekening spanningsreserve vermoeïng van de frictieverbinding 9 m/s en 20 rpm.

De levensduur van de verbinding is $4.543 \cdot 50 = 227$ jaar.



Figuur 19 Schets van overlapverbinding met korte en lange roede

15 Bijlage Partiële factoren IEC 61400 Windturbinenorm

Traditioneel wordt de Oud-Hollandse windmolen beschouwd als een bouwwerk en dientengevolge wordt ook het ontwerp en de uitvoering getoetst aan de geldende bouwnormen zoals de TGB en/of de Eurocode 3. Er zijn echter goede redenen om ook de IEC 61400-1 Windturbinenorm te beschouwen omdat deze norm meer specifiek ingaat op veiligheidsaspecten van draaiende en aan vermoeiing onderhevige onderdelen die in de bouwnorm mogelijk onderbelicht blijven. Onderstaand een uittreksel betreffende de belastingen en veiligheidsfactoren. De gehanteerde belastingfactoren worden aan de hand hiervan gemotiveerd.

Onder 7.5 worden de turbinespecifieke belastingen toegelicht. Daar is in dit rapport eerder op ingegaan, bijv. op het niet te verwaarlozen effect van de torenschaduw op de belastingen en het belang van een tijdsafhankelijk vorm van simulatie. Het gebruikte rotorperformanceprogramma speelt hierin een belangrijke rol.

Onder 7.6 wordt een uiteenzetting gegeven betreffende de partiële belastingfactoren en specifiek 7.6.1.2 gaat in op de veiligheidsaspecten. De wijkflensverbinding is een component waarvan het falen kan leiden tot het afbreken van een wijk en dient zodoende als een “non fail-safe structural component” ingedeeld te worden bij componentklasse 2.

Bij de beoordeling op sterkte wordt onderscheid gemaakt tussen materialen die beschreven staan in algemeen geaccepteerde codes en materialen waarvoor deze niet beschikbaar zijn. Voor de hier gebruikte stalen componenten zijn die beschikbaar waaruit de keuze voor een materiaalfactor $g_M=1.1$ volgt voor het constructiestaal van de roede en de flens.

	Rapport berekening molenroede, een verificatie van uitgangspunten.	pagina 50 van 57
--	--	------------------

Voor de bouten zijn tests noodzakelijk van een voldoende groot aantal bouten om karakteristieke gegevens te krijgen met 95% overschrijdingskans bij 95% betrouwbaarheid. Er kan daarbij rekening gehouden worden met de reststerkte ($\geq 1/g_M$ bij het falen van één bout) in een flensverbinding met voldoende bouten met een zekere vloeicapaciteit. De partiële factor voor consequence of failure $g_N = 1$ voor extreme belastingen maar wordt $g_N = 1.15$ als ongeteste bouten gebruikt worden. De vloeicapaciteit van bouten en moeren is van belang bij een hoog aanhaalmoment met een grote spreiding, bijv. bij het met de hand aanhalen (zie Ref. 5). In dit rapport is een g_N van 1.15 gehanteerd. Uit 7.6.2.1 tabel 3 volgt $g_F = 1.35$ voor extreme belasting, normale gevallen (bijv. de gehanteerde vermoeiingsgevallen bij 7, 8 en 9 m/s) en $g_F = 1.1$ bij abnormale gevallen (zoals het 13 m/s geval). Uit 7.6.3.1 volgt de partiële factor voor vermoeiingsbelasting $g_F = 1.0$.

Samenvatting IEC 61400-Ed.3 §7.5	g_F	g_M	g_{N1}	g_{N2}	g_{N3}
Extreem (Normaal/Abnormaal/Extr)	1.35/1.1/1.25 ¹	1.1/1.3 ²	0.9	1.0	1.3
Vermoeiing	1.0	1.1	1.0	1.15	1.3
Stabiliteit	1.35/1.25	1.2	-	-	-
Doorbuiging	1.35/1.25	1.1/1.0 ³	1.0	1.0	1.3

Tabel 29 Samenvatting IEC 61400-Ed.3 §7.5

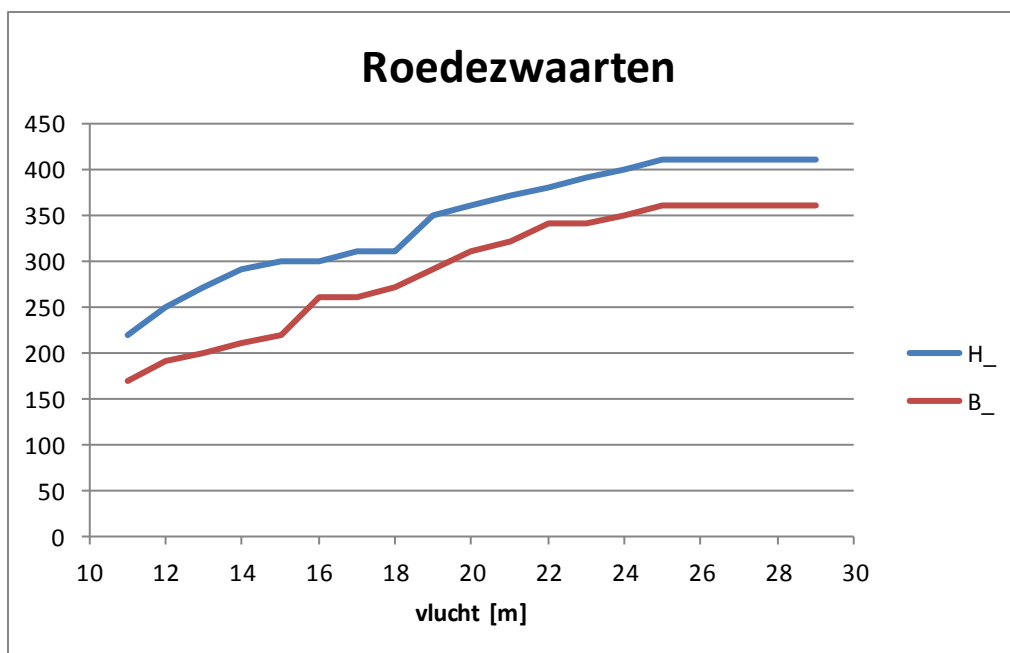
¹ 1.25 als extreme belastingen bepaald zijn dmv. statistische extrapolatie van productiegevallen

² Voor Re 1.10, voor Rm 1.30

³ Normaal 1.10, getest 1.00

16 Bijlage Rekenblad plaatschema richtlijnen 1985 en 2011.

Als bijdrage tot de discussie wat een goede rekenbelasting is voor een nieuw te ontwerpen flensverbinding of las in een wiek volgens de richtlijn is een rekenblad gemaakt dat zo goed mogelijk de belastingen en spanningen in een roede volgens ref. 1 berekent. Er is keus uit de vlucht-plaatdikte schema's van minimale en maximale zwaarte van zowel de richtlijn 1985 (ref. 2) als van de richtlijn 2011 (ref. 3). Ook is er keus uit drie profiellijnen (a, b en c),: een met lijn a (voor oud-hollands profiel), een met lijn b (idem verbeterd) en een met lijn c (is omhullende). Lijn a zou gebruikt moeten worden voor grote molens en lijn c voor kleine. In het rekenblad kan echter voor alle tabellen en alle vluchtgroottes elke profiellijn gebruikt worden. Opm. De richtlijn 2011 is toegevoegd als een latere versie van de richtlijn 1985, dus een versie voor doorgaande roeden. In het rekenblad wordt op de plaats van de deling in alle gevallen een stompe las verondersteld. De richtlijn 1985 en de richtlijn 2011 Type A veronderstellen hier een doorgaande plaat. De lasberekening op deze locatie kan bijv. gebruikt worden als er twee halve roeden aan elkaar gelast worden tbv. reparatie.



Figuur 20 Voorbeeld verloop roedezwaarten maximale middenzwaarten richtlijn 1985

Na het uitpakken dient bij het opstarten de gele knop 'Inhoud inschakelen' ingedrukt te worden. De betekenis daarvan is dat er gebruik gemaakt wordt van een macro en dat het programma zonder dat niet werkt.

Op de eerste 20 regels wordt de plaatdikte tabel uit de richtlijn weergegeven. Daaruit kan een vlucht gekozen worden door een waarde in hele meters in te voeren in cel A22 (gele cel, algemeen gebruikt om belangrijke invoercel aan te geven). De keuze is dan te maken uit maximale zwaarte of minimale zwaarte voor zowel richtlijn 1985 als richtlijn 2011 door 1, 2, 3 of 4 in te voeren. In cel A23.

Afhankelijk van de gewenste zwaarte en richtlijn wordt de bijpassende plaatdiktetabel geselecteerd en vanaf blad 3 naar het werkgebied op blad 1 gekopieërd.

De dan beschikbare grootheden worden in regel 23 t/m 31 weergegeven en spreken grotendeels voor zich. Als er te weinig plaatvelden zijn wordt daar in de weergave rekening mee gehouden in die zin dat er een nul of de bovenliggende waarde geprint wordt als iets niet berekend kan worden. Deze formules zijn cruciaal voor de verdere berekeningen en dienen niet veranderd te worden. Op elke r wordt ook $r+0.001$ weergegeven: dat is bedoeld om de doorsnede voor en na een wanddiktesprong weer te geven ter bepaling van de rond die straal hoogste optredende spanning.

constanten			belastinggeval (gele waarden aanpassen)						
ρ	1.25	kg/m ³	n	25	rpm	ω	2.63	rad/s	100 einden
ϕ_1	1.288	-	v_wind	13	m/s	Bf	6		
gF	1.5	-	hoekstand	90	deg	op 90 zetten voor geval met eigen gewicht, 0 is wijk omlaag			
tilthoek	14	deg	d ω /dt	0.00	rad/s ²	0 geen vangkoppel, 1_omw is stoppen in één omw (zonder wind)			
r_tuigage	1.9	m	(moet A21_omw	2.39	rad/s ²	hoekvertraging d ω /dt aanpassen naar behoefte			
b_tuigage	2.25	m	m_roede/2	702.4	[kg]	massa halve roede compleet	gewicht	6890.786	[N]
m_tuigage [l	23	kg/m	23 volge m_roede	965	[kg]	volgens richtlijn (hele roede zonder tuigage)			
σ_{02R}	235	Mpa	S_rc	3213.8	[kgm]	statisch moment eigen gewicht in rotorcentrum			
τ_{gij_toel}	20	Mpa	(GG14, w_r_z	4.575	[m]	zwaartepuntsstraal tov rotorcentrum			
D_as	304	mm	(schattin P_aërodyn	192908	[W]	berekenen met hoekvertraging d ω /dt = 0	Q_aërodyn	73405	[Nm]
formules			M_vang	zet F44=0	[Nm]	berekenen met hoekstand 0			
r_las	1	m	W_as	5493038	[mm ³]	weerstandsmoment van massieve ronde doorsnede met diameter D_as			
dr	1.011	m	SRF_as	1.50	[-]	Stress Reserve Factor moet groter of gelijk aan 1 zijn (incl. gF)			

Figuur 21 Invoer constanten en belastinggeval en globale uitvoergrootheden

De constanten (groen) kunnen aangepast worden maar hebben in ref. 1 waarden als boven.

ρ = luchtdichtheid in kg/m³.

ϕ_1 = vergrotingsfactor windtrillingen (in ref. 1 wordt 1.1 berekend voor 22 m vlucht maar voor grote vluchten kan deze groter zijn en daarom wordt deze berekend volgens NEN 6702).

gF = belastingfactor (in ref. 1 is deze 1.5 voor extreme belastingen).

r_tuigage = 1.9 m (waar het profiel begint). De waarde kan aangepast worden binnen de aangrenzende stralen van plaatlengtes. De massa tussen die stralen wordt aangepast.

m_tuigage = 23 kg/m, de waarde die in ref. 1 aangehouden is.

tilthoek = ashelling in graden.

σ_{02R} = de rekgrens van het roedemateriaal in Mpa (N/mm²).

τ_{gij_toel} = de toelaatbare wringspanning in het gietijzer van de ronde doorsnede van de hoofdas (GG14, waarde is incl. gF).

D_as = asdiameter tpv. de ronde doorsnede ten behoeve van de berekening van de wringspanning van het vang- resp. askoppel.

r_las = de locatie van de eerste las. De waarde kan aangepast worden binnen de aangrenzende stralen van plaatlengtes.

dr = een stap in radius voor de berekening van rotorstralen waarop krachten en momenten berekend worden.

n = toerental (ernaast wordt de hoeksnelheid in rad/s en het aantal einden getoond)

vwind = windsnelheid (ernaast wordt de windkracht op de schaal van Beaufort getoond)

hoekstand = de stand van de wijk in graden, 0 is wijk omlaag, op 90 zetten voor geval met eigen gewicht. Voor de berekening van het vangkoppel dient hier 0 ingevoerd te worden.

d ω /dt = de hoekversnelling in rad/s, voor het berekenen van het vangkoppel. Voer een waarde naar keuze in. Het resultaat is het koppel M_{vang} en een spanningsreserve in de hoofdas. Deze dient ≤ 1 te zijn (zie tevens opmerkingen bij M_{vang} en bij SRF_{as}).

1/omw = een zodanige hoekversnelling dat de rotor in één omwenteling stilstaat (zonder wind!).

Het nut hiervan is twijfelachtig omdat het bij hoge toerentallen erg grote vangkoppels geeft. Het is opgenomen omdat het in ref. 1 zo berekend werd. Voor lage toerentallen kan het nut hebben.

$m_{roede}/2$ = de massa van een halve roede berekend uit massa van de plaatvelden (incl. tuigage). Dit kan vergeleken worden met de massa van de hele roede uit de richtlijn (die eronder staat, echter zonder tuigage).

S_{rc} het statisch moment in kgm van de halve roede en de radius van het zwaartepunt r_z .

$P_{aërodyn}$ = het aërodynamisch vermogen en het bijbehorende askoppel $Q_{aërodyn}$.

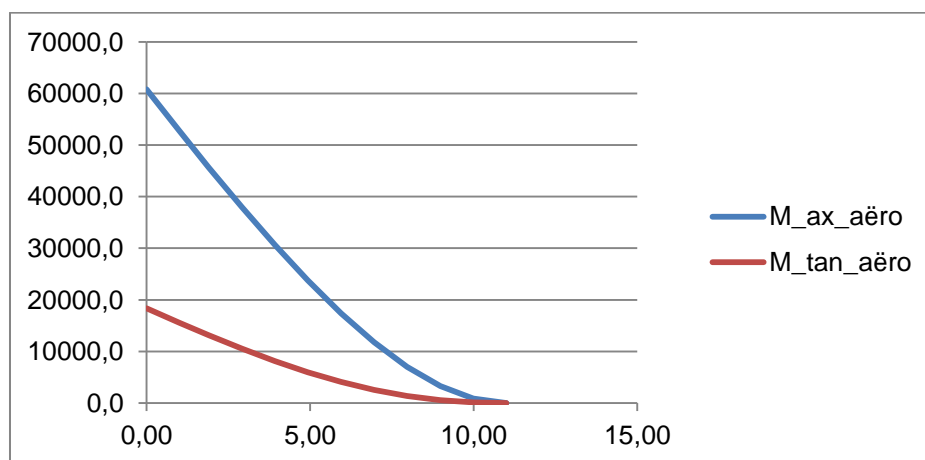
M_{vang} = het vangkoppel nodig om de ingevoerde rotorversnelling te realiseren, vergelijk dit met het windkoppel $Q_{aërodyn}$. Als het windkoppel even groot is, is de remvertraging 0. Om snel te kunnen stoppen moet het dus flink groter zijn dan $Q_{aërodyn}$.

W_{as} = weerstandsmoment van massieve ronde doorsnede met diameter D_{as} . De asdiameter is geschat uit de breedte van de askop gedeeld door een factor bepaald mbv. de asdiameter uit ref. 1.

SRF_{as} = Stress Reserve Factor van het ronde asdeel tussen askop en kroonwiel, die moet groter of gelijk aan 1 zijn (incl. gF). De SRF wordt berekend met de som van het aërodynamisch koppel en het vangkoppel.

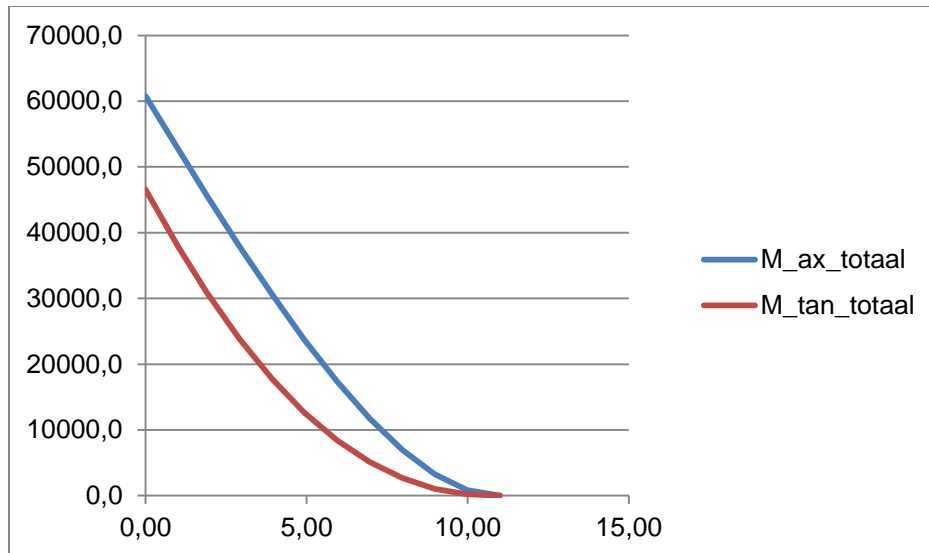
Waarschuwing: Het rekenblad opent met een belastinggeval uit ref. 1 met 13 m/s en 100 einden. Daar blijkt duidelijk uit dat deze belastinggevallen enorme vermogens/koppels kunnen genereren, die met een vang moeilijk of niet te beteugelen zijn ($P_{aërodyn} = 192$ kW). Als getracht wordt een vangkoppel te berekenen dat groter of gelijk is volgt al snel dat de wringspanning in de as te hoog wordt. In het voorbeeld bij openen: zet de hoekstand op nul en kies $d\omega/dt=1.5$. Dat geeft een vangkoppel dat 1.55 keer groter is dan het aërodynamisch koppel maar tevens een $SRF_{as} < 1$. Als op dat moment ook een lastkoppel geleverd wordt (bijv. aan een scheprad) dat even groot is als het aërodynamisch koppel dan gaat de SRF nog verder naar beneden. De hoofdas dreigt dus te bezwijken onder het gegenereerde windkoppel.

In de regels 55 t/m 68 worden de aërodynamische belastingen berekend. Dat gebeurt volgens de in ref. 1 gevolgde procedure, waarnaar voor de beschrijving wordt verwezen. De vergrotingsfactor voor windtrillingen evenwijdig aan de windrichting ϕ_1 is daarin berekend met NEN 3850. Daarbij is een eigenfrequentie berekend met een formule die geldt voor een balk met een puntmassa aan het eind hetgeen niet correct is. In het rekenblad is een procedure gebruikt met een formule voor een balk met een uniforme belasting over de hele lengte wat een betere benadering geeft en ook een iets hogere eigenfrequentie. Deze komt uit de NEN 6702 die tevens eenvoudiger toe te passen is in een rekenblad. Achter de tabellen worden grafieken weergegeven van de momenten en dwarskrachtenlijnen.



Figuur 22 Momentenlijnen axiale en tangentiale aërodynamische belasting bij 13 m/s 100 einden.

Vervolgens worden de z.g. permanente belastingen berekend. Daarbij kunnen bijv. de hoekstand, de vangbelasting en gewichtsbelasting gevarieerd worden. Rechts daarvan worden totalen berekend en ook daar zijn grafieken van snedegrootheden beschikbaar. De aanduiding “permanent” dient geïnterpreteerd te worden als een onveranderlijkheid tegengesteld aan de veranderlijkheid van de wind. Zowel het eigengewichtsmoment van de wijk als de centrifugaal of remkracht zijn natuurlijk dynamische belastingen.



Figuur 23 Momentenlijnen axiale en tangentiale totale belasting bij 13 m/s 100 einden.

In regel 98 t/m 124 worden van een aantal lokaties spanningen en spanningsreserves berekend en weergegeven, zowel extreem als vermoeiing.

laslokaties		Gebaseerd op totale spanning (buiging om twee assen + trek)												
r [m]	L_langs	D_ax_tot	D_tan_tot	M_ax_totaal	M_tan_totaal	A	Wxx	Wyy	ob_ax [Mp]	ob_tan [Mp]	ot_langs [f]	ot_tot [Mp]	ot_compr	SRF_extr
0.00	94553	31307	19829	313409	129722	0.02130	2866656.25	3058862.81	102.5	45.3	4.44	152.2	-143.3	1.0
1.50	92082	30649	17495	266911	101711	0.01733	2291784.97	2445591.99	109.1	44.4	5.31	158.8	-148.2	1.0
6.00	62417	26502	10190	137237	39732	0.00920	985653	982522	139.7	40.3	6.78	186.8	-173.2	0.8
10.50	24338	16870	4161	37092	7860	0.003	277644	245729	150.9	28.3	7.10	186.4	-172.2	0.8

Vermoeiingsspanning volgens richtlijn 1985 (voor technische levensduur van L=50 jr)						
gebaseerd op tangentieel moment tgv gewichtbelasting.				(hoekstand op 90 zetten).		
r [m]	dσ_fat	dσ_c	exp m	N_R	L [jr]	
0.00	53.5	90	5	1.47E+07	Infinite lifetime	
1.50	49.3	90	5	2.20E+07	Infinite lifetime	
6.00	36.5	90	5	9.91E+07	Infinite lifetime	
10.50	20.1	90	5	1.94E+09	Infinite lifetime	

Door andere belastingfactoren (gF_fat) of lascategorieën (dσ_C) te proberen (gele cellen) kunnen spanningsranges hoger dan de constant amplitudegrens gegenereerd worden. Die optie kan van pas komen om de grens van een roedebelasting te bepalen.

Als extra mogelijkheid (niet conform de richtlijn) wordt ook een vermoeiingsbelasting berekend door passage van de wijk door langs de romp. De windsnelheid dient echter een gemiddelde windsnelheid tijdens normaal bedrijf te zijn en 13 m/s is daarvoor te hoog. In dit rapport wordt gerekend met 6 – 9 m/s met bijbehorende lagere rotoertallen van 13 – 20 rpm (zie bijv. Tabel

	Rapport berekening molenroede, een verificatie van uitgangspunten.	pagina 55 van 57
--	--	------------------

19). Tenslotte worden beide vermoeïingsbelastingen gecombineerd worden in een resulterende spanning waarvoor tevens de vermoeïingsschade berekend wordt.

17 Eindconclusie “Schema plaatdiktes richtlijn 1985 en 2011”

Het rekenblad is een handig verificatiegereedschap. In deze bijlage worden alle roeden berekend ter controle of ze voldoen aan de eisen die er aan gesteld worden. Daarvoor wordt gebruik gemaakt van een “Wat als analyse” van het type “Gegevenstabel”. Met een dergelijke tabel is zowel de SRF extreem als de SRF vermoeïing op $r = 6$ m berekend voor twee lijsten invoer: horizontaal de keuze voor richtlijn en zwaarte (1 t/m 4) en vertikaal voor de vlucht (11 t/m 29). Daarvan zijn telkens drie tabellen gemaakt, een voor elke beschikbare profiellijn, zodat alle mogelijke combinaties van invoerparameters van de beide richtlijnen onderzocht zijn (zie volgende pagina, de bovenste rij en de onderste rij van 3 tabellen).

De controle op extreme spanning levert één roede op met een SRF kleiner dan 1 namelijk die van 28 m van de richtlijn 1985 maximale middenzwaarte. Deze roede dient berekend te worden met de profiellijn a, waarvoor de SRF op $r=6$ m 0.98 bedraagt hetgeen kleiner dan 1 is. Voor de andere profiellijnen zijn de liftkrachten nog hoger en dus is daar de SRF nog lager. Het betreft de wanddiktesprong van 10 naar 6, een afname van 4 mm. De volgende wanddiktesprong is van 6 naar 4, een afname van 2 mm. Door op blad 3 de waarde in cel O20 van 6 in 7 te veranderen wordt de sprong twee keer 3 mm en wordt de SRF in het slechtste geval 1.06.

De tabellen met de resultaten van de SRF_{fat} geven alle 3 overal een Infinite Lifetime. Dat is voldoende.

Er wordt mee aangetoond dat de doorgaande roeden van deze beide richtlijnen aan de in die richtlijnen gestelde sterkte-eisen voldoen met uitzondering van dit ene geval in de richtlijn 1985.

Disclaimer:

Het hier beschreven rekenblad is zo goed mogelijk samengesteld en gedocumenteerd volgens Ref 1. Schrijver dezes kan niet verantwoordelijk gesteld worden voor de gevolgen van het gebruik ervan.

profiellijn a					profiellijn b					profiellijn c				
SRF_extreem station 2 bij 13 m/s 35 rpm gF=1.2					SRF_extreem station 2 bij 13 m/s 35 rpm gF=1.2					SRF_extreem station 2 bij 13 m/s 35 rpm gF=1.2				
1.1	1	2	3	4	0.9	1	2	3	4	0.9	1	2	3	4
11	10.00	10.00	10.00	10.00	11	10.00	10.00	10.00	10.00	11	10.00	10.00	10.00	10.00
12	10.00	10.00	10.00	10.00	12	10.00	10.00	10.00	10.00	12	10.00	10.00	10.00	10.00
13	10.00	10.00	10.00	10.00	13	10.00	10.00	10.00	10.00	13	10.00	10.00	10.00	10.00
14	10.00	10.00	10.00	10.00	14	10.00	10.00	10.00	10.00	14	10.00	10.00	10.00	10.00
15	8.45	9.35	1.69	10.00	15	8.31	9.20	1.66	10.00	15	8.17	9.03	1.64	10.00
16	1.88	5.94	1.61	10.00	16	1.86	5.85	1.59	10.00	16	1.83	5.76	1.57	10.00
17	1.83	4.26	1.46	10.00	17	1.81	4.19	1.44	10.00	17	1.78	4.12	1.42	10.00
18	1.69	1.52	1.40	1.38	18	1.66	1.50	1.38	1.36	18	1.64	1.48	1.36	1.34
19	1.53	1.57	1.34	1.34	19	1.51	1.55	1.31	1.32	19	1.48	1.52	1.29	1.30
20	1.42	1.48	1.46	1.30	20	1.40	1.46	1.43	1.28	20	1.37	1.43	1.41	1.26
21	1.31	1.48	1.34	1.33	21	1.29	1.45	1.32	1.30	21	1.26	1.42	1.29	1.28
22	1.25	1.51	1.48	1.27	22	1.23	1.48	1.45	1.25	22	1.21	1.45	1.42	1.22
23	1.14	1.37	1.62	1.35	23	1.12	1.34	1.59	1.32	23	1.10	1.32	1.56	1.30
24	1.41	1.41	1.57	1.28	24	1.38	1.38	1.54	1.26	24	1.35	1.36	1.50	1.23
25	1.26	1.31	1.46	1.45	25	1.24	1.29	1.43	1.42	25	1.21	1.26	1.39	1.39
26	1.17	1.18	1.37	1.31	26	1.15	1.15	1.34	1.28	26	1.12	1.13	1.31	1.25
27	1.13	1.05	1.58	1.41	27	1.11	1.03	1.55	1.38	27	1.08	1.00	1.51	1.34
28		0.96		1.54	28		0.94		1.50	28		0.92		1.46
29		1.11		1.39	29		1.08		1.35	29		1.05		1.31
profiellijn a					profiellijn b					profiellijn c				
Infinite life					Infinite lif					Infinite lif				
1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	
11	Infinite life	Infinite	Infinite	Infinite lifetime	11	Infinite life	Infinite life	Infinite lif	Infinite lifetime	11	Infinite lif	Infinite life	Infinite lifetin	Infinite life
12	Infinite life	Infinite	Infinite	Infinite lifetime	12	Infinite life	Infinite life	Infinite lif	Infinite lifetime	12	Infinite lif	Infinite life	Infinite lifetin	Infinite life
13	Infinite life	Infinite	Infinite	Infinite lifetime	13	Infinite life	Infinite life	Infinite lif	Infinite lifetime	13	Infinite lif	Infinite life	Infinite lifetin	Infinite life
14	Infinite life	Infinite	Infinite	Infinite lifetime	14	Infinite life	Infinite life	Infinite lif	Infinite lifetime	14	Infinite lif	Infinite life	Infinite lifetin	Infinite life
15	Infinite life	Infinite	Infinite	Infinite lifetime	15	Infinite life	Infinite life	Infinite lif	Infinite lifetime	15	Infinite lif	Infinite life	Infinite lifetin	Infinite life
16	Infinite life	Infinite	Infinite	Infinite lifetime	16	Infinite life	Infinite life	Infinite lif	Infinite lifetime	16	Infinite lif	Infinite life	Infinite lifetin	Infinite life
17	Infinite life	Infinite	Infinite	Infinite lifetime	17	Infinite life	Infinite life	Infinite lif	Infinite lifetime	17	Infinite lif	Infinite life	Infinite lifetin	Infinite life
18	Infinite life	Infinite	Infinite	Infinite lifetime	18	Infinite life	Infinite life	Infinite lif	Infinite lifetime	18	Infinite lif	Infinite life	Infinite lifetin	Infinite life
19	Infinite life	Infinite	Infinite	Infinite lifetime	19	Infinite life	Infinite life	Infinite lif	Infinite lifetime	19	Infinite lif	Infinite life	Infinite lifetin	Infinite life
20	Infinite life	Infinite	Infinite	Infinite lifetime	20	Infinite life	Infinite life	Infinite lif	Infinite lifetime	20	Infinite lif	Infinite life	Infinite lifetin	Infinite life
21	Infinite life	Infinite	Infinite	Infinite lifetime	21	Infinite life	Infinite life	Infinite lif	Infinite lifetime	21	Infinite lif	Infinite life	Infinite lifetin	Infinite life
22	Infinite life	Infinite	Infinite	Infinite lifetime	22	Infinite life	Infinite life	Infinite lif	Infinite lifetime	22	Infinite lif	Infinite life	Infinite lifetin	Infinite life
23	Infinite life	Infinite	Infinite	Infinite lifetime	23	Infinite life	Infinite life	Infinite lif	Infinite lifetime	23	Infinite lif	Infinite life	Infinite lifetin	Infinite life
24	Infinite life	Infinite	Infinite	Infinite lifetime	24	Infinite life	Infinite life	Infinite lif	Infinite lifetime	24	Infinite lif	Infinite life	Infinite lifetin	Infinite life
25	Infinite life	Infinite	Infinite	Infinite lifetime	25	Infinite life	Infinite life	Infinite lif	Infinite lifetime	25	Infinite lif	Infinite life	Infinite lifetin	Infinite life
26	Infinite life	Infinite	Infinite	Infinite lifetime	26	Infinite life	Infinite life	Infinite lif	Infinite lifetime	26	Infinite lif	Infinite life	Infinite lifetin	Infinite life
27	Infinite life	Infinite	Infinite	Infinite lifetime	27	Infinite life	Infinite life	Infinite lif	Infinite lifetime	27	Infinite lif	Infinite life	Infinite lifetin	Infinite life
28		Infinite lifetime	Infinite lifetime		28		Infinite lifetime	Infinite lifetime		28		Infinite lifetime	Infinite life	
29		Infinite lifetime	Infinite lifetime		29		Infinite lifetime	Infinite lifetime		29		Infinite lifetime	Infinite life	

	Rapport berekening molenroede, een verificatie van uitgangspunten.	pagina 57 van 57
--	--	------------------