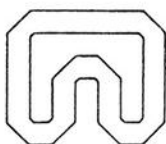


Berekening Molenroede

Dit rapport werd samengesteld in opdracht van de
Rijksdienst voor Monumentenzorg te Zeist



door:
Ingenieursbureau W.O. Wassenaar b.v. te Haren

December 1980

INHOUD

Woord vooraf

Verklaring van technische en wetenschappelijke termen

Symbolen

1. Historisch overzicht
2. Literatuur onderzoek
 - 2.1. Algemeen
 - 2.2. Prinsenmolen
 - 2.3. Berekening roeden volgens methode ing P.G. Weeber
 - 2.4. Berekening roeden volgens methode ing J.H. Knol
3. Krachten en invloeden op een molenroede
4. Berekeningsgrondslagen
 - 4.1. Windsnelheid en omwentelingssnelheid waarbij de roeden dienen te worden berekend
 - 4.2. Lift- en weerstandscoefficient
 - 4.3. Zwaarst belaste situatie
 - 4.4. Luchtdichtheid
 - 4.5. Trillingsfaktor
 - 4.6. Veiligheidscoefficient
 - 4.7. Dynamische belasting
 - 4.8. Dwarskracht
 - 4.9. Permanente belasting
 - 4.10. Wiekafmetingen
 - 4.11. Vangen van de molen
 - 4.12. Wiekvormen
5. Berekeningsmethode en voorbeelden
 - 5.1. Aerodynamische belasting
 - 5.2. Permanente belasting
 - 5.3. Centrifugale kracht
 - 5.4. Spanning tijdens het vangen
 - 5.5. Berekeningsvoorbeeld
 - 5.6. Controleberekening bij hoge gang
6. Buiten de berekening gelaten invloeden
 - 6.1. Invloed van de dwarskracht
 - 6.2. Invloed wringing
 - 6.3. Coriolis kracht
 - 6.4. 2^o orde effecten
 - 6.5. Niet loodrecht door de wind belast maalvlak
 - 6.6. Krachten op een wiekenkruis in rust
 - 6.7. Invloed biljoening
 - 6.8. Invloed zelfzachtende jaloeziewieken en andere wiekvormen
 - 6.9. Invloed hekgaten
 - 6.10. Temperatuursinvloeden
 - 6.11. Invloed doorbuiging heklatten
 - 6.12. Omhullende lift- en weerstandscoefficient en trillingsgetal
 - 6.13. Vervorming tijdens de montage.

7. Berekening overige onderdelen
- 7.1. Kontrole wiekenas
- 7.2. Berekening houten roede
- 7.3. Berekening heklatten

8. Vergelijking van roedeprofielen
- 8.1. Inleiding
- 8.2. Vergelijking

9. Samenvatting en konklusie

10. Litaratuur

11. Tabellen

12. Grafieken

13. Bijlagen

Woord vooraf

Bij de bouw van molens en molenroeden is ervaring en overlevering altijd het belangrijkste uitgangspunt bij het ontwerp geweest.

Om voor de bepaling van de afmetingen van de roeden tot een landelijk eensluidende norm te komen heeft de Rijksdienst voor de Monumentenzorg ons bureau verzocht een theoretische studie te verrichten welke moest leiden tot een landelijk voorschrift voor roedeafmetingen.

Deze opdracht hadden wij niet kunnen aanvaarden zonder dat wij ons gesteund wisten door de grote kennis en kundigheid welke de Rijksdienst zelf in huis had.

Het analytisch inzicht van ir P.K.v.d. Schuit en de molen-deskundigheid van dhr J.T.M.Gunneweg vormden de klankbodem voor die studie.

Het historisch overzicht is voor het grootste deel van de hand van dhr J.T.M.Gunneweg.

Ook de studies van ing J.H. Knol van de Provinciale Groninger Molencommissie en de theoretische aanpak van ing P.G.Weeber hebben bijgedragen tot de totstandkoming van dit rapport.

Uiteindelijk bleek alleen het prinsenmolenboek betrouwbare meetgegevens over de relatie tussen roedevorm, windkracht, snelheid en koppel te kunnen leveren.

Meer onderzoek in deze materie is gewenst om tot een nog nauwkeuriger inzicht in de werking van een roede te kunnen komen.

Haren, december 1980,

ir W.O.Wassenaar

Verklaring van technische en wetenschappelijke termen

Axiaal	In de richting van de wind.
Eigen trilling	Eigen frekwentie van een lichaam
Invalshoek	Hoek tussen de schijnbare windrichting en het hekwerk.
Lift	Kracht loodrecht op de schijnbare windrichting (tangenciaal).
Maalvlak	Vlak waarin het wiekenkruis draait.
Schaal van Beaufort	Schaalaanduiding voor windsnelheden
Schijnbare wind	Samenstelling van de draaiende bewegingssnelheid en de windsnelheid.
Tanddruk	Druk op een tand van een tandwiel (bij het gaande werk van molens spreekt men van "kammen" i.p.v. tanden).
Tangenciaal	Loodrecht op de windrichting.
Vlaagfactor	Faktor die aangeeft de verhoogde windsnelheid gedurende een korte periode.
Weerstandskrachten	Krachten in de richting van de wind (axiaal).

Verklaring molentermen

As	Zie wiekenas
Asrad/wiel	Zie bovenwiel
Baljoening	Zie biljoening
Biljoenen	Het afschuinen of afronden van één of meer zijden of kanten van een houten balk.
Biljoening	Algemeen: de door biljoenen ontsta- ne schuine of ronde kant; Bij molen roede: de zeegvormige afschuining van de voorkant (zie hoofdstuk 1).
Binnenroede	De roede die het dichtst bij de mo- lenkap door de wiekenas loopt.
Borden	Zie windborden.
Borstroe	Uit 3 delen samengestelde houten roede.
Bovenwiel	Het grote houten wiel dat op de wiekenas is bevestigd en waarom- heen zich de vang bevindt.
Buitenroede	De roede die de binnenroede kruist en het verst van de molenkap af ligt.
Einden, enden	Halve roeden, compleet met tuigage; dit is de molenaarsterm voor "wieken". "De molen loopt 80 enden" molenaarsterm om de snelheid van het wiekenkruis aan te geven; het aantal enden per minuut dat de molenromp passeert. (Het aantal enden : 4 = het aantal omwentelin- gen per minuut van de wieken as).

Gang	Het lopen van het wiekenkruis."De molen loopt met een gang van 60 enden!"
Groot rad/- wiel	Zie bovenwiel.
Hekgat(en)	Zie heklatten.
Heklatten	De taps gezaagde houten latten die (ongeveer) haaks op de roede staan en zijn opgesloten in de hekgaten; ze worden onderling verbonden door (ongeveer) evenwijdig aan de roede lopende zomen of zoomlatten en vormen samen daarmee het hekwerk, waarop het molenzeil kan worden uitgerold. (zie ook hoofdstuk 1) De wind op het zeil drukt de heklatten loodrecht op de roede.
Hekschee/--schi	Zie heklat.
Hekwerk	Zie heklat.
Jalouzieklep(pen)	Komen voor bij molens met zgn. "jalouzie-wieken": plankjes die onder invloed van de winddruk draaibaar zijn om een as (ongeveer) haaks op de roede en in gesloten stand een vlak vormen dat overeenkomt met het hekwerk met zeil van het traditioneel wieksysteem. Kom vooral voor in de provincie Groningen.
Kruis	Zie wiekenkruis.
Midden-zwaarte	De breedte en hoogte van de roede bij de as-doorgang (bij kokerprofielen in moderne staalkonstrukties veelal aangeduid als "diameter"), de term is in oorsprong afkomstig van de houten roede. De doorsnede-maten van houten konstruktiedelen werden algemeen als "zwaarte" aangeduid.
Molenroede	Houten of kokervormig stalen balken waar de heklatten in zijn bevestigd: De binnen- en de buitenroede zijn vastgewigd in de askop en vormen samen met de complete tuigage het wiekenkruis.
Oud-Hollands wiekprofiel-wieksysteem	Het traditioneel wieksysteem met hekwerk, windborden en voorzoom. (zie hoofdstuk 1)
Porring	Algemeen: diepte van de bocht bij gebogen onderdelen van bouwkundige konstrukties; bij molenroeden: de bocht van de (binnen)roede.
Potroede	Geklonken roede gefabriceerd door de Gebr.Pot; later ook wel gebruikt als soortnaam voor geklonken roeden in het algemeen, althans voorzover gefabriceerd volgens het door Pot toegepaste konstruktiesysteem (zie ook hoofdstuk 1)

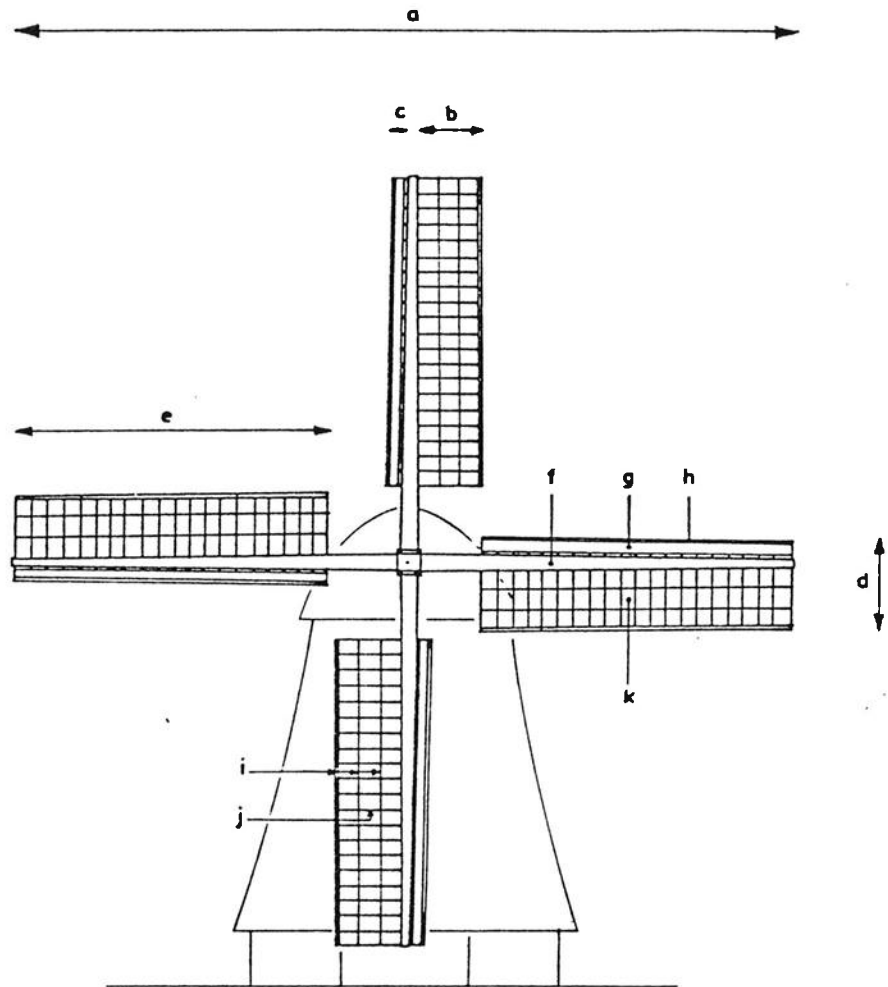
Roede	Zie molenroede.
Schei(en)	Zie heklatten.
Stormborden/planken	Zie windborden.
Stroomlijnneus/-profiel	Verzamelnaam voor alle stroomlijn- vormige bekledingen die in deze eeuw zijn ontwikkeld ter vervanging van de windborden en voorzoom van het oud- Hollandse profiel (Dekker, van Bussel Prinsenmolenprofiel).
Tuigage	Het samenstel van heklatten, zomen, windborden e.d. waarmee een roede is opgetuigd.
Vangen	Het tot stilstand brengen van het wiekenkruis d.m.v. de vang (=rem).
Vangwiel	Zie bovenwiel.
Vleugel	Zie molenroede.
Vlucht	De lengte van de roede; m.a.w. de diameter van de denkbeeldige cirkel die de toppen van de roede bij het draaien door de lucht beschrijven.
Voorhek	De voorzoom met de windborden tesa- men (zie ook hoofdstuk 1 fig 0); deze term herinnert aan de al enige eeuwen niet meer voorkomende "dwarsgetuigde" roede.
Wiek	Zie einden, enden.
Wiekbekleding	Zie tuigage.
Wiekenas	De as in de molenkap, waarin de roe- den zijn bevestigd ("gestoken") en het bovenwiel op is vastgewigd; vroe- ger van hout, thans bij de meeste molens van gietijzer.
Wiekenkruis	Zie bij verklaring molenroede.
Windborden/-planken	De wegneembare planken tussen de roede en de voorzoom (zie ook hoofd- stuk 1, fig 0).
Zeeg	De schuinte van de heklatten t.o.v. het maalvlak; ook het totale daar- door gevormde schroefvormig gebogen vlak van het hekwerk.
Zeilbreedte	De voor het molenzeil beschikbare breedte van het hekwerk (zie ook hoofdstuk 1, fig 0).
Zeilkikker	De op de voorzijde van de roede be- vestigde haken (8-15 per end) t.b.v. de bevestiging van het molenzeil.
Zelfzwichter	Molen met een wiekenas voorzien van zelfzwichting.
<u>Zelfzwichting</u>	Ook genoemd "jalouziewieken"; zie verder bij de verklaring van jalouzie- kleppen. N.B.

N.B.

Er bestaan nog andere wieksystemen waarbij automatisch of halfautomatisch zwichten mogelijk is, meestal is hierbij een, al dan niet in de lengte richting gedeelde, klep aanwezig die ter vervanging van het hekwerk met zeil dient en om een evenwijdig aan de roede lopende as kan draaien.

Ze worden ten onrechte soms ook met de term "zelfzwichting" aangeduid doch hieronder dient uitsluitend te worden verstaan het systeem van de jalouziewieken. De andere systemen worden meestal genoemd naar hun ontwerpers (Bilau, van Riet en Ten Have) Zie bij verklaring heklatten. Het verminderen van het windvangend oppervlak; veelal vermindering van zeiloppervlak.

Zomen, zoomlatten
Zwichten



- a. vlucht = lengte buitenroede
 - b. zeilbreedte
 - c. voorhekbreedte
 - d. windvangende breedte
 - e. lengte tuigage
 - f. roede
 - g. windbord
 - h. voorzoom
 - i. zoomlatten
 - j. heklatten
 - k. hekwerk
-] voorhek
] hekwerk } tuigage

fig. 0

Symbolen:

a	versnelling
b	breedte
c	coëfficiënt
c_l	liftcoëfficiënt
c_w	weerstandcoëfficiënt
d	dikte
g	versnelling zwaartekracht
l	lengte halve roede
m	massa
n	aantal omwentelingen per tijdseenheid
q	aerodynamische stuwdruk
r	afstand van de as tot de doorsnede
t	tijd
u_r	snelheid van een punt op een afstand r van de as
v	snelheid
v_{wind}	windsnelheid
w	schijnbare windsnelheid
x	afgelegde weg
A	axiale kracht
A_o	oppervlak omsloten door een hartlijn
D	dwarskracht
F	centrifugale kracht
I	traagheidsmoment
I_p	polair traagheidsmoment
K	kracht
K_c	corioliskracht
L	liftkracht
M	moment
M_{wr}	wringmoment
O	oppervlak
S	statisch moment
T	tangentiale kracht
W	weerstandsmoment
W_g	wrijvingskracht
X	as orthogonaal assenkruis (horizontaal)
Y	as orthogonaal assenkruis (vertikaal)
α	zeeg
β	hoek tussen schijnbare wind en maalvlak
γ	veiligheidscoëfficiënt
δ	invalshoek tussen de schijnbare wind en het hekwerk
ϵ	hoek
ρ	dichtheid van de lucht
τ	schuifspanning
ω	hoeksnelheid
σ	spanning
σ_c	totaalspanning
ϕ	trillingsfaktor
Σ	som

Symbolen aangegeven overeenkomstig de aangehaalde normbladen.

1.

HISTORISCH OVERZICHT

Oorspronkelijk werden de roeden en vrijwel alle andere molenonderdelen van hout vervaardigd. (fig.1)

Door het moeilijk kunnen verkrijgen van rechte stammen van een goede houtkwaliteit en onder invloed van het probleem van veelvuldige roedebreuk, werden, kort na 1850 bij de opkomst van de ijzerindustrie, de eerste ijzeren molenroeden gemaakt, uitgevoerd als een holle kokerconstructie van op "hoeklijn" (hoekijzer) geklonken platen. Ook andere houten molenonderdelen werden in die tijd door ijzeren verdrongen. Vóór de Tweede Wereldoorlog werd al incidenteel tot het maken van "gelaste" ijzeren roeden overgegaan.

Het is niet verwonderlijk dat de geklonken ijzeren roeden voor wat hun vorm betreft gelijkenis vertoonden met hun houten voorgangers, waarvan fig. 2 een doorsnede geeft. Op enige afstand was een ijzeren roede dan ook moeilijk van een houten roede te onderscheiden.

Hoewel in feite vallend buiten het kader van dit rapport achten wij het toch van belang om bij wijze van inleiding aan de hand van een aantal, door de medewerkers van de onderafdeling Molens van de Rijksdienst voor Monumentenzorg, verzamelde gegevens een globale schets te geven van de ontwikkeling van de ijzeren c.q. stalen geklonken en gelaste roeden.

De belangrijkste constructie van de geklonken roede is getekend in fig. 2 en bestaat uit een holle koker van vier op hoekijzer geklonken platen waarvan de voorplaat (de dicht op de hoekijzers aansluitende zijkanten uitgezonderd) de vorm heeft van de in de houten roeden aanwezige biljoening. Verder is de koker rechthoekig met uitzondering van de top-einden waar hij de doorsnede heeft van een parallelogram. De voor- en rugplaat lopen ongeveer evenwijdig aan de omhoogwijzende le hekschee. Hoewel dit bij houten roeden ook zo was en dus als vormnabootsing kan worden beschouwd, heeft het hier een zuiver konstruktieve achtergrond. Door de geringe dikte van de roeden aan de toppen 80 - 100 mm is dit de enige mogelijkheid om de hekgaten op de juiste plaats te krijgen zonder dat hiervoor de hoekijzers behoeven te worden beschadigd. In de lengterichting gezien lopen de aanzichten van de zijplaten, met uitzondering van een zuiver recht stuk van 2 à 3 meter in het midden, volgens fraai gebogen lijnen. Dit is het best te zien bij een binnen roede welke, om aan de einden enigszins te sporen met de buiten roede, een "porring" heeft van 300 à 400 mm. De buitenroede heeft in het algemeen geen porring, hetgeen betekent dat de voorplaat, afgezien van de biljoening, over de gehele lengte van de roede een zuiverrecht verloop heeft. De hekgaten liggen aan de bordzijde zover onder de voorplaat dat de hoekijzers hiervoor niet onderbroken behoeven te worden. (In het midden van de roede zijn ter plaatse van de einden van de huizen van de wiekenas, de twee zogenaamde wigschotten geplaatst die het indrukken van de platen, tengevolge van het aandrijven van de spieën waar

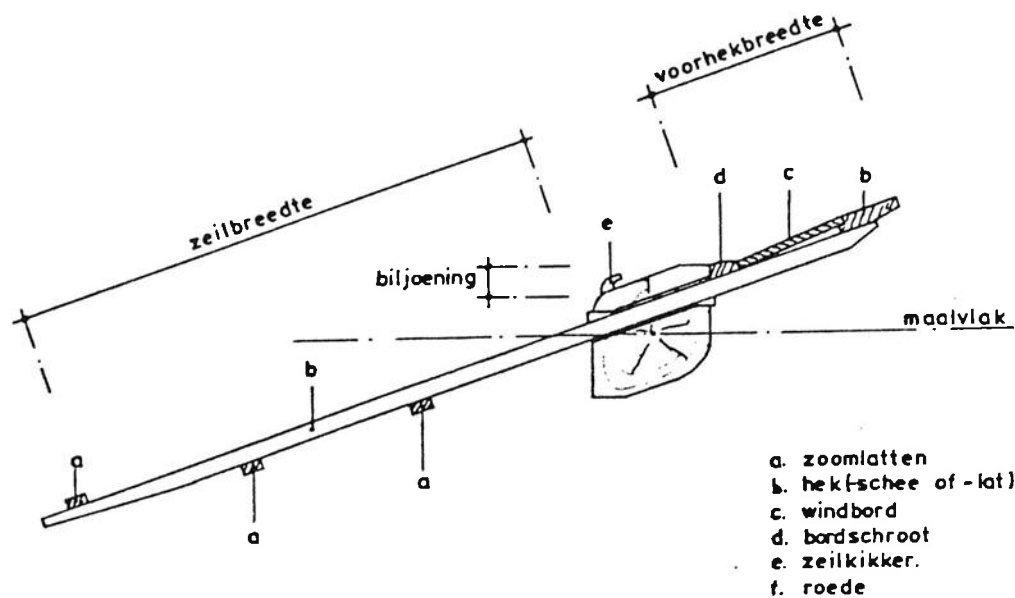


fig. 1.
houten roede met oud-hollandse tuigage (schaal 1: 20, drsn. t.p.v. 20^e hek vlucht ca. 22 m)

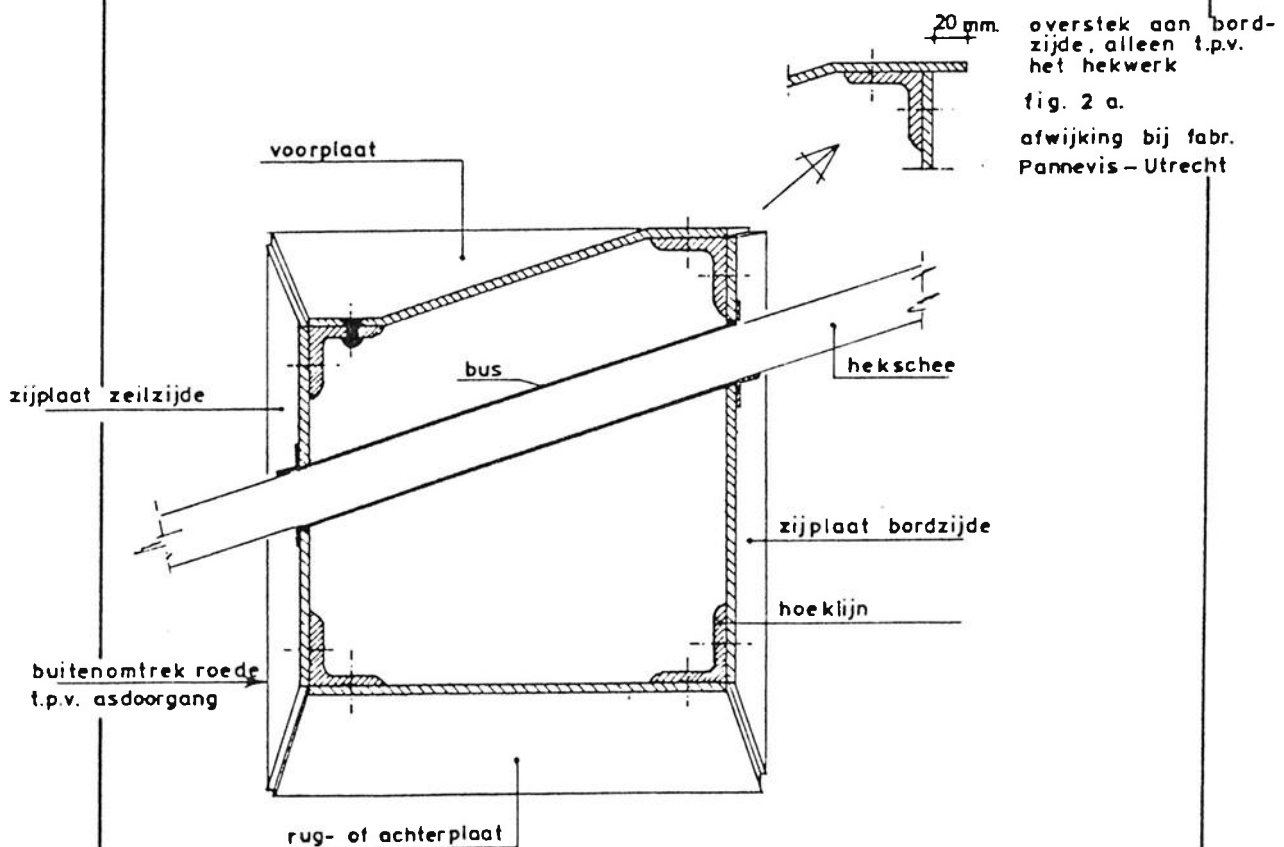


fig. 2
geklonken roede systeem Pot. (schaal 1: 5, drsn. t.p.v. 20^e hek, vlucht ca. 22 m.)

mee de roede in de askop opgesloten wordt, moeten voorkomen. Dit zijn de enige dwars in de koker staande schotten). De stuiknaden van de lengte-delen der platen zijn onderling verbonden door inwendig aangebrachte schetsplaten. In de hekgaten zijn bussen gestoken van dun plaatijzer waarvan de uiteinden als ovaal afgewerkte lippen aan de buitenzijde van de roede zijn omgezet. De roeden worden zo bepaald niet waterdicht en een inwendige bescherming werd niet aangebracht. Desondanks was de levensduur van sommige van deze roeden ruim 100 jaar. Hier zal de corrosiebestendigheid van het toen gebruikte koolstofrijke "puddelijzer" en het feit dat, door het geregeld in bedrijf zijn van de betreffende molen(s), het in de roede gekomen water er direct weer uitliep, een belangrijke rol hebben gespeeld.

Na jarenlange stilstand van een buitenwerking gekomen molen bleek steeds dat van de horizontaal staande roede, waarvan het water dat via de hekgaten naar binnenliep niet makkelijk weg kon, de toestand slechter was dan van de vertikaal staande roede, waar het water als het ware vanzelf uitdroop. De kwestie van de "hemelwaterafvoer" vormde voor de polderbesturen dan ook een extra argument om hun molenaars te verplichten hun molens bij stilstand in de zomerperiode vast te zetten in de "overhekstand", d.w.z. de roeden onder 45° met de horizon, waardoor het water uit beide roeden weg kon lopen.

De belangrijkste en meest bekende fabrikant van geklonken ijzeren molenroeden was de firma Gebr. B.Pot te Elshout a/d Kinderdijk, nabij Alblasterdam, gelegen op een steenworp afstand van het beroemde molencomplex gevormd door de boezembemaling van de waterschappen De Over- en de Nederwaard (bestaande uit resp. 8 grote houten rietgedekte achtkante en 8 grote ronde stenen poldermolens met vluchten variërend van 27,55 m tot 29 m). Het is niet toevallig dat daar in dat molenrijke gebied waar zich de specifieke problemen met de houten roeden aan de lopende band manifesteerden, een scheepswerfje dat geleidelijk van houtbouw op ijzeren geklonken konstrukties overging en oorspronkelijk uit zijn voorraad grenen balkhout voor masten e.d. ten behoeve van houten roeden ook balken leverde aan de molenmakerij, de eerste geklonken ijzeren roede ontwikkelde.

De eerste ijzeren roede zal in of kort voor 1853 zijn gestoken in een van de molens van de Nederwaard. Al spoedig volgden er meer. De langs proefondervindelijke weg vastgestelde dimensionering van platen en hoeklijnen bleek goed te zijn gekozen. Enkele van de roeden van de eerste generatie zouden meer dan 100 jaar blijven funktioneren. Het vertrouwen dat de fabrikanten in hun produkt hadden steeg met het jaar. Vermeldt een voorgedrukte aannemingsovereenkomst in 1862 nog een garantietermijn van 3 jaar in 1866 was deze termijn al verhoogd tot 6 jaar. De zaken gingen "voor de wind", in 1865 werden 86 roeden gemaakt, in 1876 was men toe aan nr 1060, in 1881 aan nr 1275 en in 1889 werd nr 1550 gemaakt (de volgnummers werden met een centerpons in de voorplaat boven het ovale gietijzeren naamplaatje geslagen). Blijkens een niet gedateerd overzicht, dat waarschijnlijk

uitgegeven is aan het eind van de jaren 20 van deze eeuw, is het aantal geleverde roeden tot dan opgelopen tot 2700 stuks "waaronder vele zelfzwichters". Dat de datering "eind van de jaren 20" redelijk klopt kan blijken uit het feit dat er komen vast te staan dat roede nr 2543 in 1924 is geleverd ten behoeve van één van de molens van "De Zes Wielen" nabij Alkmaar. Terzijde vermelden wij hier een prijs: Een roede van 90 amsterdamsche voet ($\pm 25,5 \text{ m}^1$) kostte in de jaren 1862 tot 1868 f 455,-- (vierhonderdvijfenvijftig gulden!). Door de teruglopende vraag naar nieuwe molenroeden als gevolg van het afnemen van het economische belang van windmolens, gaan de zaken rond de eeuwwisseling achteruit en wordt het vervaardigen van roeden in de 40-er jaren geheel gestaakt. Intussen was de naam van de firma Gebr. B.Pot via de roeden en, zij het in veel mindere mate, ook via geklonken ijzeren spruiten, staartbalken en zelfs via windpeluws en voeghouten, door het gehele land en ook daarbuiten verspreid.

Was de werf van de Gebr.B.Pot voor wat betreft de roeden het belangrijkste en het meest bekend, toch moeten volledigheidshalve ook enkele andere fabrikanten worden vermeld. Zo had machinefabriek Pannevis te Utrecht een kleine konstruktievariant aangebracht in de uitvoering (fig. 2.a.). Een enkele maal treft men nog een roede van dit fabriekaats aan, zoals de onlangs door gelaste roeden vervangen exemplaren van de Torenmolen te Gronsveld (L) (secundair gebruikt, ingekort). De af en toe in bedrijf zijnde standaardmolen te Baexem (L) heeft een stel met stalen kokers verlengde Pannevisroeden die al eerder in twee andere molens dienst hebben gedaan.

Noemen wij vervolgens enkele bedrijven, waarvan thans geen roeden meer bestaan, maar waarvan via schriftelijke bronnen vast staat dat ook zij geklonken roeden hebben vervaardigd, te weten de ijzergieterij en fabriek van stoom en andere werktuigen Wed.E.A. Sterkman en Zn. "De Prins van Oranje" te 's-Gravenhage (waarvan nog wel gietijzeren wiekenassen bestaan) en "De Alkmaarse IJzergieterij", die in 1885 de roeden leverde voor de molens van het waterschap De Schermer.

In het noorden van het land noemen wij Wieringa in Vierverlaten (Gn) wiens zoon werfbaas werd bij machinefabriek Gorter te Hoogezand (Gn). Op basis van door hem ingebracht kennis werd daar van het einde van de tweede wereldoorlog tot omstreeks 1955 de konstruktie van geklonken roeden ter hand genomen. Deze roeden bevinden zich o.a. nog in de korenmolen te Kropswolde (Gn) (gestoken in 1944, de molen kwam in 1945 buiten bedrijf, de roeden zijn thans in zeer slechte staat) en in "De Zwaluw" te Nieuwe Pekela, hier betreft het de binnenroede, deze werd in 1950 gestoken gelijk met de door Gorter, bij wijze van experiment als gelaste koker uitgevoerde, buitenroede. Deze molen is nog dagelijks in bedrijf. In 1973 werden de roeden voor het eerst "doorgeschoven", d.w.z. de roede werd zover verschoven dat het zich in de as bevindende gedeelte bereikbaar

werd voor inspectie en conservering, waarna de geklonken roede van een fokwiek systeem werd voorzien met gewoon hekwerk en de gelaste buiten roede werd voorzien van een zelfzachtend systeem volgens het door Ten Have ontwikkelde principe. Heden (1978) verwacht de molenaar dat beide roeden, mits de molen niet buiten bedrijf komt, nog wel 20 jaar meegaan .

Het konstruktiebedrijf Gorter is na dit éénmalige experiment niet van het geklonken systeem afgestapt, hetgeen mede een gevolg was van het feit dat een Gronings konstruktiebedrijf verscheidene gelaste roeden had gemaakt waarvan er een aantal braken . Nadere gegevens met betrekking tot de konstruktiewijze van deze roeden zijn niet bekend. De roeden van Gorter hadden geen biljoening, maar vormden over de gehele lengte een zuiver rechthoekig koker profiel.

Voor wat betreft de geklonken roeden noemen wij nog twee fabrikanten van roeden die volgens een geheel ander systeem waren gekonstrueerd (fig. 3) en wel de firma Verhage uit Ruddervoorde (België) en het bedrijf van de Gebr. Franssen uit Vierlingsbeek (N.Br). Vooral in het zuiden van het land waren veel molens van deze "Belgische roeden" (dit was de term, die bij molenaars en molenmakers ter onderscheiding van de "Potroeden", in zwang raakte) voorzien. Deze roeden waren nogal licht uitgevoerd, hetgeen vooral voor standaardmolens een voordeel was maar waar tegenover stond dat deze roeden bij extreme weersomstandigheden sneller braken en sneller doorgeroest waren vooral als de molen langere tijd stilstond. Dit is dan ook de reden dat er maar weinig van deze roeden over zijn .

Hoewel het aantal molens in het begin van deze eeuw sterk terugliep, bleven er, doordat men de kultuur-historische waarde van de molen was gaan inzien, een aantal behouden en in gebruik. Hierdoor bleef op bescheiden schaal behoefte aan nieuwe ijzeren/stalen roeden ter vervanging van de houten of de oudste geklonken exemplaren. Het elektrisch lassen ging, in de plaats van het klinkwerk, een rol spelen. Voor zover kan worden nagegaan is het oudste voorbeeld van toepassing van gelaste molenroeden te vinden in Noord-Holland bij de achtkante binnenkruier van de polder Obdam. Deze roeden werden in 1936 geleverd door de firma Wijnveen uit Voorthuizen. Aan de roeden werd het Bilau-wieksysteem gemonteerd. De roeden werden gestoken in plaats van uit drie delen samengesteld (een stalen koker waaraan twee houten einden, een soort "borstroe" principe , waaraan eveneens Bilau-wieksysteem was gemonteerd. Door doorbuiging van de houten einden liepen de lagers van de kleppen vast waardoor één van de houten einden op een gegeven moment los schoot). De in 1936 gestoken roeden werden later ontdaan van het Bilau-wieksysteem; er werden hekgaten in gemaakt zodat het gebruik van de traditionele molenzeilen weer mogelijk werd. Nog later werden fokwieken aangebracht, (het systeem van Ir. Fauël) zo opgetuigd doen ze thans, 42 jaar later nog dienst!

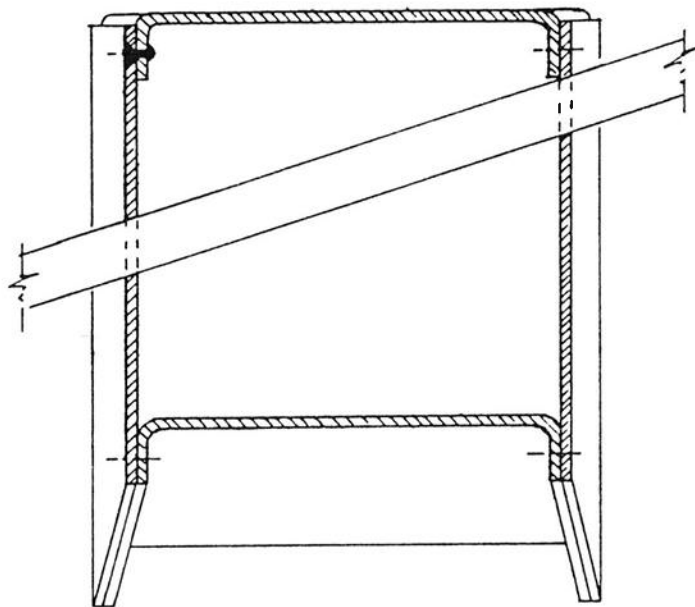


fig. 3.
 geklonken roede; systeem Franssen Vierlingsbeek (NBr.)
 en Verhage Ruddervoorde (België)
 ("Belgisch" systeem)

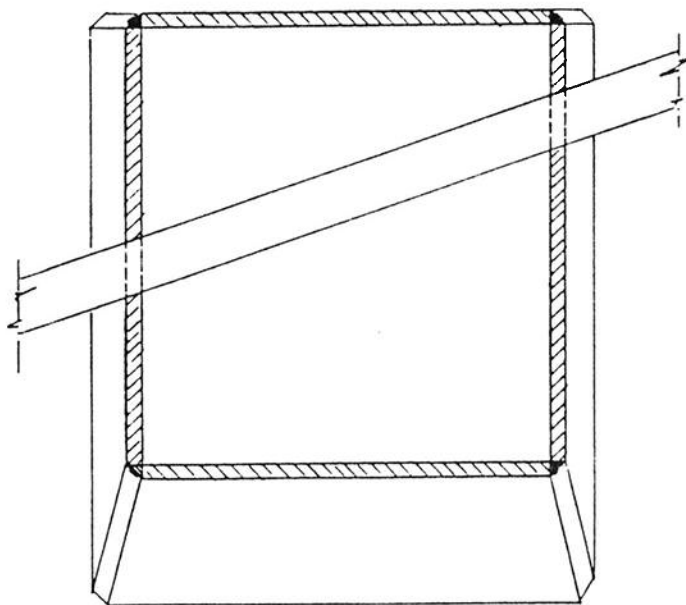


fig: 4
 gelaste stalen roede zonder biljoening.

Na de Tweede Wereldoorlog is men meer met gelaste roeden gaan werken. Deze roeden werden uitgevoerd volgens een simpel rechthoekig kokerprofiel (zie fig. 4). De zijaanzichten vertoonden strakke lijnen waardoor bij de binnenroede, ter plaatse van het eind van het volledig rechte middenstuk, een storende knik te zien was, als gevolg van de zogenaamde porring.

De plaatdikten werden ook hier vaak proefondervindelijk vastgesteld, hetgeen, door de geringe gelegenheid tot het opdoen van ervaring, de kans op onaangename verrassingen vergrootte. Sommige roeden braken vroegtijdig, bij andere bleken verstevigingen noodzakelijk (o.a. bij de Wipmolen in de polder Blokweer nabij Alblasserdam). Het latere rekenwerk dat met betrekking tot de konstruktie van gelaste molenroeden is verricht komt ter sprake in hoofdstuk 2. Wat de konstruktiedetails betreft nog het volgende: De kokerkonstruktie bevat net als de geklonken roede slechts 2 dwarsschotten, dit zijn geen gesloten platen, de hoeken zijn eraf geknipt en in het midden is een grote cirkelvormige opening gesneden. Tegen de randen van de in de zijplaten uitgesneden hekgaten zijn de hekscheden vastgespied. Soms zijn in de hekgaten bussen aangebracht van dun verzinkt plaatstaal met omgezette einden, à la Pot. Meestal is de koker verder open en aanvankelijk kreeg de binnenzijde geen enkele bescherming. Het huidige konstruktiestaal is veel minder korrosiebestendig dan het ijzer waar Pot en z'n collega's mee werkten, hierdoor is men overgegaan op het staalstralen en het aanbrengen van korrosiewerende verf. Dit had echter het bezwaar, dat het aanbrengen van de verf vóór het lassen moest geschieden, dat het lassen niet gehinderd mocht worden en dat door door hitte optredende beschadigingen niet nabehandeld konden worden. Tegenwoordig is het vrij algemeen dat men na het lassen, de na het staalstralen blank gelaten plaatzijden van de koker, inwendig tectyleert.

Men heeft ook geprobeerd een roede te maken als een in één geheel gelaste koker. In de hekgaten werden dichte bussen gelast. Hierbij bleek hoe moeilijk het is, een koker echt vochtdicht te maken. Er kwam toch vocht in deze koker en het was niet makkelijk dit vocht er weer uit te krijgen.

Voor wat betreft de vormgeving dient te worden vermeld dat sinds de 60er jaren veel stalen roeden zijn gemaakt waarvan de voorplaat een biljoening vertoont, ongeveer zoals de "Pot-roeden" die ook kenden. Een doorsnede van een dergelijke roede geeft figuur 5.

Tegenwoordig houdt een beperkt aantal, meest kleine konstruktiebedrijven zich, meestal als specialiteit, met het vervaardigen van roeden bezig.

Een globale schatting van het aantal thans in Nederland gestoken gelaste roeden ligt omstreeks de 500.

Door de Rijksdienst voor Monumentenzorg wordt nu gewerkt aan een ontwerp voor uniforme richtlijnen voor de fabricage van stalen gelaste molenroeden. In het kader hiervan heeft ons bureau opdracht gekregen tot het verrichten van het in

dit verslag vastgelegde onderzoek, ook zijn in dit kader recent voor de korenmolen te Kloetinge (Z) twee gelaste roeden gemaakt die, op initiatief van de eigenaar van deze molen, zo zullen worden uitgevoerd dat ze de gebogen vorm van de vroegere Potroede zoveel mogelijk benaderen.

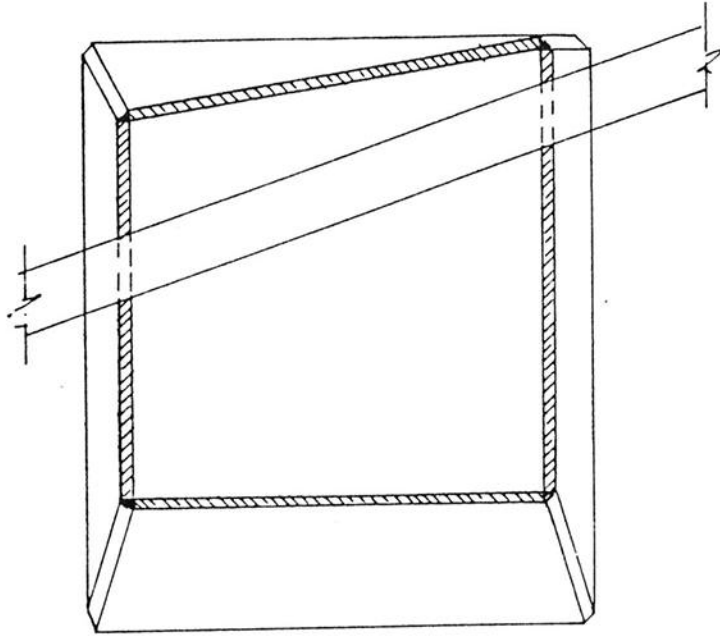


fig. 5
gelaste stalen roede met biljoening

2. LITERATUUR-ONDERZOEK

2.1. Algemeen

De dimensionering van de onderdelen is door de eeuwen heen veelal op empirische gronden tot stand gekomen. Toch heeft men herhaaldelijk geprobeerd om o.a. de krachten te bepalen die op molenwieken worden uitgeoefend om zodoende vooraf het vermogen te bepalen. Men zou dan tevens in staat zijn verschillende onderdelen te dimensioneren.

2.2. Prinsenmolen

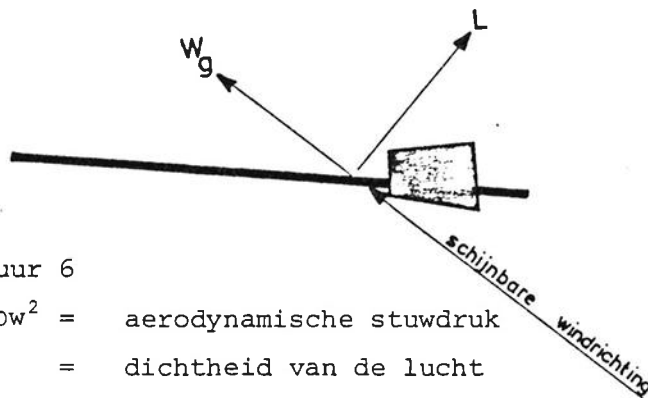
Het eerste uitgebreide onderzoek werd verricht in 1937 aan de Prinsenmolen te Hillegersberg. Het doel van dit onderzoek was, zonder het zuiver hollands karakter van de Prinsenmolen aan te tasten, het rendement van deze molen te verhogen. Bij deze molen waren hiertoe verschillende mogelijkheden. Als voornaamste kunnen genoemd worden de verandering van het wateropvoermechanisme en de verandering en de aanpassing van de wieken. Door toeval kon men beschikken over een schaalmodel van de Prinsenmolen waarop schaalproeven konden worden gedaan. Veel van deze onderzoeken werden gedaan in het Laboratorium van Aero- en Hydrodynamica van de Technische Hogeschool te Delft.

Uit dit onderzoek kwamen o.a. de volgende opmerkingen:

- Windsnelheid wisselt sterk in de tijd. De wind is in een korte periode nagenoeg nooit konstant.
- Wind waait niet evenwijdig aan het aardoppervlak. Wind heeft de grootste capaciteit op een wiekstelsel waarvan het maalvlak onder een hoek van 14° staat.
- Het al of niet in bedrijf zijn van de molen is afhankelijk van de windsnelheid. Er is een windsnelheid nodig om de wieken (enden) op gang te brengen. Bij de Prinsenmolen, voorzien van een oud-hollands wiekprofiel, is deze snelheid ongeveer 9 m/sec. De molen kan hierna draaiende blijven tot bij een afname van de windsnelheid tot 6 à 7 m/sec.
- Een molen voorzien van een oud-hollands wiekprofiel zal op maximaal vermogen draaien wanneer deze in volle zeil staat bij een windsnelheid waarin vlagen voorkomen van ± 13 m/sec. Dit komt neer op windkracht 5 op de schaal van Beaufort bij een vlagfactor 1,45.
- Bij een toename van de windsnelheid wordt de molenaar gedwongen te zwichten d.w.z. het zeiloppervlak te verminderen. De snelheid van de wieken bedraagt bij 13 m/sec. ongeveer 100 enden/min., dat wil zeggen 25 omwentelingen per minuut.
- De windsnelheden gelden in open veld. Geheel anders wordt het wanneer door omliggende bebouwing de windsnelheid en daardoor de omwentelingsnelheid onvoorspelbaar kunnen toenemen.

- Tengevolge van de wind en het draaien van de wieken worden de wieken belast door een schijnbare windrichting.
- Omdat de wind de wieken doet draaien zal de wind krachten op de wieken uitoefenen.
- De windkrachten die op de wieken werken resulteren uiteindelijk in twee loodrecht op elkaar staande krachten, de weerstandskracht (W_g) en de liftkracht (L). Tengevolge van de luchtstroming langs de wieken ontstaan luchtdrukverschillen voor en achter het hek, die uiteindelijk resulteren in een liftkracht. De weerstandskracht is de (weerstand)kracht die het wiekprofiel ondervindt in de luchtstroming.

$$W_g = \frac{1}{2} \rho w^2 c_w \quad \text{en} \quad L = \frac{1}{2} \rho w^2 c_l$$



figuur 6

$\frac{1}{2} \rho w^2$ = aerodynamische stuwdruk

ρ = dichtheid van de lucht

w = schijnbare windsnelheid

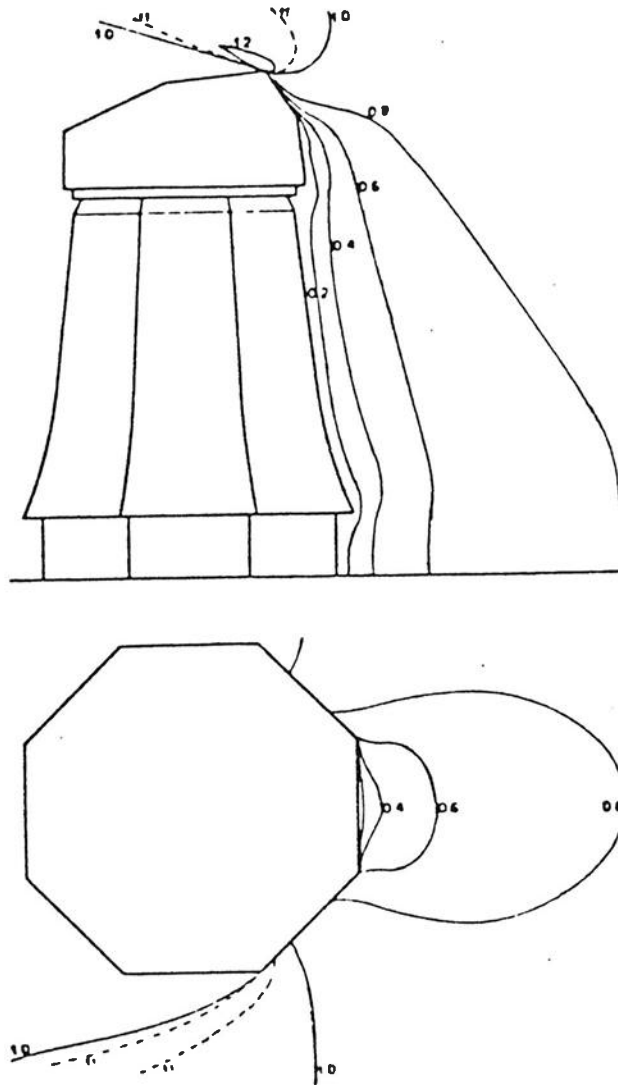
c_l = lifcoëfficiënt

c_w = wrijvingscoëfficiënt

W_g = wrijvingskracht

L = liftkracht

- Om de wind zo optimaal mogelijk te benutten d.w.z. reeds bij een lage windsnelheid een optimaal vermogen, zal men streven naar een wiekprofiel, waarvan de liftkrachten zo groot mogelijk zijn en de wrijvingskrachten zo klein mogelijk. Hiertoe heeft men een twintigtal wiekprofielen in het laboratorium onderzocht. Uit dit onderzoek blijkt dat het ondoenlijk is om op exakte wijze de liftkracht te bepalen vanuit de windsnelheid. De liftkracht is o.a. sterk afhankelijk van de profielvorm. Bovendien is de wind onregelmatig van sterkte.
- De molen zelf is een storend element in de luchtstroming, waardoor de krachten uiteenlopen op verschillende plaatsen van het maalvlak.



figuur 7: Lijnen met gelijke percentages van de windsnelheid teweeggebracht door een achtkantige romp.

- Bij de Prinsenmolen is een oplossing gevonden in het toepassen van een, uit de laboratoriumproeven ontwikkeld, stroomprofiel. De eerder bij het oud-hollandsprofiel geconstateerde waarden van de windsnelheden betreffende het aanlopen, malen en zwichten, vermeld op pag. 7 kwamen door de verbetering van 9 m/sec. aanloopsnelheid op 6,5 m/sec. en van 6 à 7 m/sec. op 4 m/sec. als minimum windsnelheid voor het opganghouden van de molen. Het maximale vermogen kan de molen bereiken bij een windsnelheid waarin vlagen voorkomen van 10 m/sec. en een gang van 100 à 110 enden/min. in tegenstelling met het oud-hollands wiekprofiel waarbij de waarden respectievelijk 13 m/sec. en een gang van 100 enden/min. waren, welke waarden tevens gelden als

uiterste zwichtgrens. Bovendien werd bij het nieuwe gestroomlijnde wiekprofiel de breedte van volzeil teruggebracht van 2,75 m naar 2,30 m.

- Invloed van massatraagheid.

Als de massatraagheid klein is draaien de wieken makkelijk, doch de omtreksnelheid wisselt met de windsnelheid. Bij grotere massatraagheid blijft de molen konstanter draaien bij wisselende windsnelheden.

- De krachten die op de roede worden uitgeoefend heeft men op de volgende wijze bepaald:

De liftkracht uit de tanddruk die gemeten werd aan het bovenwiel van de Prinsenmolen vermeerderd met een percentage ten gevolge van de wrijving van de verschillende onderdelen. De kracht ten gevolge van de axiale ontbondene van de windkracht bleek het grootst als de relatieve windsnelheid ten opzichte van de wieken het grootst was. Deze kracht werd per meter-wiek lengte bepaald. De voornoemde krachten, lift en wrijving, op de roede leverden momenten in de verschillende doorsneden, waaruit de spanningen ter plaatse van de doorsnede bepaald konden worden.

De berekening werd uitgevoerd op de bestaande Pot-roeden die waren voorzien van een oud-hollands wiekprofiel. In het totale onderzoek aan de Prinsenmolen was deze berekening slechts van zijdelings belang.

2.3. Berekening roeden volgens methode ing.P.G.Weeber

Evenals bij de methode, uiteengezet in het verslag van het onderzoek van de Prinsenmolen, werd ook hier uitgegaan van de ongunstigste belasting van de molenroede. De ongunstigste stand is die waarbij de wiek horizontaal staat in neerwaardse richting. In deze stand werken eigen gewicht en liftkracht in dezelfde richting.

Omdat de invloeden van c_l en c_w van vele factoren afhankelijk zijn, is bij de methode volgens Weeber van de onderzochte wiekprofielen genoemd in het Prinsenmolenboek, de omhullende bepaald van de c_l - en c_w -coëfficiënt en als funktie van de invalshoek δ van de wind. In het gebied $\delta > 45^\circ$ zijn de coëfficiënten van vlakke platen genomen, omdat bij deze hoeken geen gegevens beschikbaar waren.

Uitgaande van een aangenomen windsnelheid van 13 m/sec., hoeksnelheid 100 enden/min. en gegeven hekafmeting, kan op verschillende afstanden van de as het aerodynamische moment worden bepaald waarbij voor c_l en c_w de waarden uit de omhullende worden aangehouden. Alle weerstands- en liftkrachten en ook het eigen gewicht worden in rekening gebracht. Alle andere krachten worden verwaarloosbaar geacht.

Uit de aldus ontstane momentenlijnen voor de roede kan op ieder punt de spanning bepaald worden.

2.4. Berekeningsmethode volgens ing J.H.Knol

De berekeningsgrondslagen hiervoor waren nagenoeg gelijk aan die van de voorgaande methode.

Doordat hier de winddruk konstant werd aangenomen over de hek Lengte kunnen hier, in een aantal doorsneden ten opzichte van de molen, de momenten bepaald worden en aldus de daar heersende spanningen worden samengesteld. Bij deze methode werd tevens rekening gehouden met de krachten die optreden bij het vangen (remmen) van de molenwieken. De heer Knol ging hierbij uit van een remweg van één eind ofwel $\frac{1}{2}$ omwenteling.

3.

KRACHTEN EN INVLOEDEN OP DE MOLENROEDEN

Permanente krachten

- A. Eigen gewicht van de roede.
- B. Eigen gewicht van het tuigage inclusief eventuele stroomlijnneuzen.
- C. Eigen gewicht zeilen.

Invloeden t.g.v. de wind

- D. Windkracht evenwijdig aan de windrichting (weerstand).
- E. Windkracht loodrecht op de windrichting (liftkracht).
- F. Wringing t.g.v. windkracht op het hekwerk.

Invloeden t.g.v. draaien van de wieken

- G. Centrifugale kracht.
- H. Kracht van Coriolis.
- J. Vangkrachten.

Bijzondere invloeden

- K. Invloed van vocht op de wieken en de zeilen.
- L. 2^o-orde effecten.
- M. Eigentrillingsgetal van de molenroede t.o.v. het trillingsgetal veroorzaakt door de wind en het draaien van de wieken.
- N. Mogelijke invloed indien de wind niet loodrecht op het maalvlak staat.
- O. Krachten van het wiekenkruis in rust.
- P. Invloed van biljoening.
- Q. Invloed zelfzwichting en andere automatisch en half-automatisch zwichtende wieksystemen.
- R. Vermoeing.
- S. Temperatuursinvloeden.
- T. Invloed doorbuiging heklatten.

In hoofdstuk 4 "Berekeningsgrondslagen" worden de uitgangspunten voor de berekening gemotiveerd.

In hoofdstuk 5 "Berekeningsmethoden" wordt de methode van samenstelling van de krachten op de roede toegelicht. Tevens worden de benodigde formules afgeleid.

Aan het eind van hoofdstuk 5 wordt een berekeningsvoorbeeld gegeven.

4. BEREKENINGSGRONDSLAGEN

4.1. Windsnelheid en omwentelingssnelheid waarbij de roederdienen te worden berekend.

Bij de Prinsenmolen, genoemd in het hoofdstuk literatuur, voorzien van een oud-hollands wiekprofiel, werd de molen naar geacht tot zwichten van de zeilen over te gaan wanneer met geleidelijk aanwakkerende wind de wind opliep tot 13 m/s. In de windvlaag kreeg de molen een gang (snelheid van de wieken) van 100 enden/min, hetgeen overeenkomt met 25 omw/min. De gemiddelde windsnelheid bedraagt dan $v = 8,97$ m/s bij een vlagfaktor van 1.45. De gemiddelde windsnelheid $v = 8,97$ m/s komt overeen met windkracht 5 op de schaal van Beaufort.

In de hierna volgende berekeningen zullen ook de windsnelheid $v = 13$ m/s en een gang van 100 enden/min worden aangehouden als maximale waarden bij wieken met vol zeil, volgens oud-hollands wiekprofiel.

Voor wieken voorzien van een gestroomlijnd profiel gelden respektievelijk de waarden 10 m/s windsnelheid en een gang van 110 enden/min.

De windsnelheid en de omwentelingssnelheid geldt voor molens in het open veld. Grote moeilijkheden kunnen ontstaan bij een molen die grenst aan naburige bebouwing waardoor windsnelheden enorm kunnen toenemen. Bovendien kunnen hier onverwacht sterke windstoten voorkomen.

Indien een molen zich in een dergelijke situatie bevindt zal men zwaardere uitgangspunten moeten overwegen of verbieden dat een molen in een dergelijke positie nog met behulp van windkracht dienst doet.

Omdat een wiekenkruis incidenteel aan de haal kan gaan, zal een controle moeten plaats vinden bij een windsnelheid van 13 m/s en 140 enden/min, resp. 10 m/s en 140 enden/min voor een gestroomlijnd profiel.

4.2. Lift- en weerstandcoëfficiënt

Uit de berekeningen zal blijken dat de grootste krachten op de wieken worden uitgeoefend in draaiende toestand. De wind oefent op de wieken krachten uit die sterk afhankelijk zijn van de invalshoek, dit is de hoek gevormd door de schijnbare windrichting en het hekwerk. De grootte van deze krachten bedragen:

$$K = \frac{1}{2} \rho w^2 O'$$

waarin K = kracht
 ρ = luchtdichtheid
 w = schijnbare windsnelheid
 O = oppervlak
 $\frac{1}{2}\rho w^2$ = aerodynamische stuwdruk

De wieken ondervinden ten gevolge van de hierop werkende windkracht zowel een liftkracht, die de wieken doet bewegen, als een weerstandskracht. In het verleden zijn voor het onderzoek aan de Prinsenmolen veel wiekprofielen onderzocht in het laboratorium voor aerodynamica. De resultaten hiervan zijn weergegeven in het Prinsenmolenboek.

Een twintigtal wieken werden beproefd bij verschillende windsnelheden en invalshoeken en met en zonder beklede hekken. De resultaten werden uitgedrukt in coëfficiënten bij verschillende invalshoeken.

$$\begin{aligned} \text{Liftcoëfficiënt} & & : c_l &= \frac{L}{Oq} \\ \text{Weerstandscöefficient} & & : c_w &= \frac{W_g}{Oq} \end{aligned}$$

waarin : L = Liftkracht
 O = Oppervlak
 q = Aerodynamische stuwdruk ($\frac{1}{2}\rho w^2$)
 W_g = Weerstandskracht

Voor de berekeningen zijn deze coëfficiënten uitgezet tegen de invalshoek. Bij de proeven was het niet mogelijk om bij iedere invalshoek de lift- en weerstandscöefficient te bepalen. Om toch een indicatie van de betreffende c_l en c_w -waarden te verkrijgen werden deze verzameld uit proefresultaten op een vlakke plaat. Deze coëfficiënten zijn sterk afhankelijk van de vorm van de wieken en van de invalshoek. Omdat het vooralsnog niet mogelijk is bij een gegeven wiekprofiel deze coëfficiënten te verkrijgen zonder deze van te voren via proeven te bepalen zijn voor de berekening van de roeden de omhullenden van de coëfficiënten van de profielen uit het Prinsenmolenboek bepaald, wetende dat dit de ongunstigste situatie weergeeft bij een te berekenen roede. Immers zowel lift als weerstand zijn dan maximaal. Zie bijlage 3 en 4. (Bijlagen 1 en 2 geven de uitkomsten uit het Prinsenmolenboek). Zie ook 4.12.

4.3. Zwaarst belaste situatie

De zwaarst belaste situatie voor de roede is die wanneer de roede zich horizontaal bevindt in neerwaardse beweging. Het eigen gewicht en de liftkrachten werken in dit geval in dezelfde richting.

4.4. Luchtdichtheid

$$\rho = 0.125 \text{ kg s}^2/\text{m}^4$$

4.5. Trillingsfaktor

Aangezien wieken slanke trillingsgevoelige konstrukties zijn waarbij het niet ondenkbaar is dat de roede in eigen trilling komt, wordt in de windrichting een faktor

$\Phi = 1.1$ ingevoerd. Loodrecht op de windrichting is $\Phi = 1.0$. De afleiding van deze factoren zal in het berekeningsvoorbeeld worden toegelicht.

4.6. Veiligheidscoëfficiënt

De veiligheidscoëfficiënt bij staal $\gamma = 1.5$, volgens NEN 3851.

4.7. Dynamische belasting

Stel een molen heeft een gemiddelde gang van 40 enden/min. Dit komt overeen met $10 \text{ omw/min} = 2 \times 10 = 20$ spanningswisselingen/min. Stel 1000 draaiuren per jaar, dan treden er per jaar $1000 \times 60 \times 20 = 1.200.000$ spanningswisselingen op. Stel de levensduur van de molenroede op 50 jaar. In 50 jaar treden $50 \times 1.200.000 = 6 \times 10^7$ spanningswisselingen op. Bij dit aantal spanningswisselingen ($> 10^6$) is de konstruktie vermoeiingsgevoelig. In de V.O.S.B. 1963 wordt afhankelijk van de lascoëfficiënt en het quotiënt $\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ een toelaatbare spanning gegeven. Deze voorschriften worden binnenkort aangepast. In de nieuwe normen wordt uitgegaan van een vaste relatie tussen de "stress-range" $S (= \sigma_{\max} - \sigma_{\min})$ en het aantal spanningswisselingen voor een bepaald type las. Bij meerdere spanningswisselingen is de konstruktie vermoeiingsgevoelig.

4.8. Dwarskracht

Toelaatbare spanning t.g.v. dwarskracht $\tau = 0.58 \times 240 = 139 \text{ N/mm}^2$ (vlgs NEN 3851).

4.9. Permanente belasting

Oud-hollands wiekprofiel	:	
Eigen gewicht tuigage + zeil + windplanken		
inklusief natte zeilen etc.		11.5 kg/m ²
Gestroomlijnd wiekprofiel	:	
Eigen gewicht tuigage + zeil		
inklusief natte zeilen etc.		11.5 kg/m ²
Eigen gewicht stroomlijnneuzen		18 kg/m ²
Zelfzwichtig	:	
Zelfzwichtig met jalouziekleppen		
Eigen gewicht jalouzieën etc.		11.5 kg/m ²
Eigen gewicht stroomlijnneuzen		18 kg/m ²

De vermeerdering in permanente belasting van de jalouzieën t.o.v. oud-hollands wiekprofiel kan gelijk gesteld worden aan de vermindering van de vochttopname gerekend voor natte zeilen. Voor de overige systemen van zelfzwichting zullen afzonderlijk berekeningen dienen te worden gemaakt.

4.10.

Wiekafmetingen

Van wieken zijn de roede-afmetingen bij de asdoorgang, de afmetingen van de tuigage en de zeeg vaststaande gegevens voor de betreffende molen.

Voor wieken voorzien van gestroomlijnde profielen kan voor de profielbreedte globaal 0,8 x de breedte van een oud-hollands profiel worden aangehouden:

4.11.

Vangen van de molen

Voor de berekening zal worden uitgegaan van een remweg van 4 enden eenparig vertraagd. Bij deze zware eis zal meestal de wringspanning in de wiekenas maatgevend worden in plaats van de spanningen in de roede. De wiekenas heeft voor de betreffende molen vaststaande gegeven afmetingen.

4.12.

Wiekvormen

Er is in Nederland een grote verscheidenheid aan wiek-vormen, welke echter in drie hoofdvormen kunnen worden onderverdeeld:

- a) oud-hollands profiel
- b) stroomlijnprofiel (met zeil).
- c) overige profielen, waaronder profielen met zelfzwiching.

Gebleken is, dat de invloed van de wiek-vormen op de weerstandscoefficient gering is, maar dat er bij de liftcoefficient aanzienlijke verschillen kunnen optreden. Dit laatste is dan ook van invloed op de uiteindelijke spanningen in de roede en daarmee ook op het eigen gewicht.

Het is van belang, dat bij de dimensionering van een roede wordt gestreefd naar een laag eigen gewicht om al te grote krachten op de molen zelf (met name op de wiekenas) te vermijden.

Bij kleine vluchten (≤ 22 m) wordt het eigen gewicht echter in sterke mate bepaald door praktische eisen t.a.v. de uitvoering (minimale plaatdikte en middenzwaarte), zodat de spanningen in het algemeen laag zijn. Daardoor is het bovengenoemde verschil in liftcoefficient voor deze roeden van minder belang.

De in 4.2. genoemde omhullende voor de liftcoefficient kan zonder meer voor alle wiek-vormen (≤ 22 m)

worden toegepast, zonder dat dit in de praktijk tot een belangrijke verhoging van het eigen gewicht leidt.

Bij grotere vluchten is de invloed van de liftcoefficient aanzienlijk groter en zou bovengenoemde omhullende in veel gevallen leiden tot extreem zware roeden.

Daarom wordt voor deze roeden in de berekening wel verschil gemaakt tussen de liftcoefficienten hetgeen tot uitdrukking komt in bijlage III.

Hierin hoort: lijn a) bij molens met oud hollands profiel 28

lijn b) bij molens met stroomlijnprofiel
lijn c) bij overige molens (= bovengenoemde
omhullende)

Het is duidelijk, dat het van groot belang is, dat de voor de berekening te kiezen waarde van c_1 specifiek hoort bij de toe te passen roedevorm.

In onze berekeningen van roeden met vluchten > 22 m zijn wij uitgegaan van een oud-hollands profiel (lijn a), terwijl de overige plaatdikten op alle molens (≤ 22 m) van toepassing zijn (lijn c).

In alle gevallen is voor de roedegegevens (zeilbreedte, zeeg, zeillengte enz.) uitgegaan van de ongunstigste waarden, die voorkomen.

In geval van andere wiekvormen dan oud-hollandse zal bij vluchten > 22 m een aparte berekening met gebruikmaking van de juiste roedegegevens en c_1 lijn nodig zijn.

Hoewel onvoldoende empirische gegevens bekend zijn van het stroomlijnprofiel met zeil is duidelijk dat de c_1 coëfficiënten hoger zijn. (bijvoorbeeld lijn b).

In de praktijk heeft een stroomlijnprofiel in verhouding tot de grootste afmetingen van een oud hollands profiel een geringere zeilbreedte, een minder diepe zeeg en zal bij een lagere windsnelheid het punt worden bereikt dat niet meer met vol zeil gemalen wordt.

5.

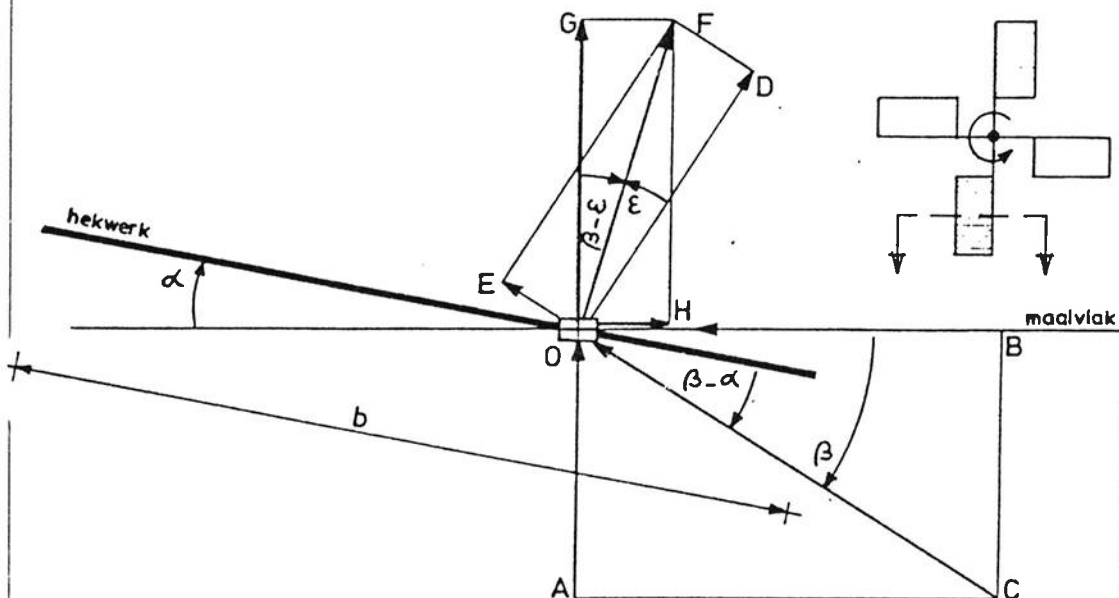
BEREKENINGSMETHODE en voorbeeld

De grootste belastingen op een roede zijn de aerodynamische belasting en de permanente belasting. Daarnaast speelt de centrifugaalkracht nog een ondergeschikte rol. In dit hoofdstuk wordt aangegeven op welke wijze de verschillende invloeden in de berekening worden verwerkt.

5.1.

Aerodynamische belasting

De aerodynamische belasting op een draaiend wiekenstelsel wordt als volgt bepaald:



Figuur 8 , aerodynamische belasting op een wiekdoorsnede.

Vlak OB is het maalvlak

OA is de windsnelheid

OB is de omtreksnelheid u_r ter plaatse van de doorsnede van het wiekprofiel. $u_r = \omega \times r$

Waarin: r = de afstand van de doorsnede tot de as

$$\omega = \frac{2\pi n}{t}$$

n = het aantal omwentelingen per tijdseenheid

t = tijd

OC is de schijnbare windsnelheid $w = \sqrt{v^2 + u_r^2}$
 Het punt O op de wiek ervaart bij stilstand alsof de wind
 komt uit de richting AO. Tengevolge van alleen de rotatie
 linksom, ervaart punt O alsof de luchtverplaatsing komt
 vanuit de richting BO.

CO is de schijnbare windsnelheid in grootte en richting
 door samenstelling van de snelheden AO en BO.

De schijnbare windsnelheid CO maakt een hoek β met het
 maalvlak.

$$\beta = \arctg \frac{v \text{ wind}}{u_r} = \arctg \frac{v \text{ wind}}{\omega r}$$

α = de zeeg van het hekwerk t.o.v. het maalvlak.

De invalshoek van de relatieve stroming ten opzichte van
 het profiel is dus $\delta = \beta - \alpha$

In paragraaf 4.2. is beschreven hoe empirisch een relatie
 is gevonden tussen de invalshoek δ en de weerstands- en
 liftcoëfficiënt c_w en c_l

De op de wiek werkende krachten per eenheid van lengte
 ter plaatse van de doorsnede zijn:

- 1) loodrecht op OC : OD = $\frac{1}{2} \rho b w^2 c_l$ (weerstandskracht)
- 2) in richting OC : OE = $\frac{1}{2} \rho b w^2 c_w$ (liftkracht)

De resultante van OD en OE = OF

De grootte van OF = $\frac{1}{2} \rho w^2 b \cdot (c_l^2 + c_w^2)$

OF maakt een hoek ϵ met OD.

De kracht OF wordt ontbonden in een component OG lood-
 recht op het maalvlak, de axiaalgerichte kracht (A) en
 een component OH in het maalvlak, de tangentiaal gerichte
 kracht (T)

Deze krachten dienen nog vermenigvuldigd te worden met
 een trillingsfaktor ϕ die afhankelijk is van de doorbui-
 ging (stijfheid) van de roede.

De grootte van de aerodynamische krachten wordt dus:

$$A = \phi \cdot \frac{1}{2} \rho w^2 b \sqrt{c_l^2 + c_w^2} \cos(\beta - \epsilon)$$

$$T = \phi \cdot \frac{1}{2} \rho w^2 b \sqrt{c_l^2 + c_w^2} \sin(\beta - \epsilon)$$

5.2. Permanente belasting

Het eigen gewicht van de molenroede en het tuigage ver-
 oorzaakt aanzienlijke krachten op de roede. De vorm en
 uiterlijke afmetingen van de molenroede worden groten-
 deels bepaald door de afmeting van het gat in de wiekenas
 waarin de roede wordt vastgezet en de vastgestelde vorm
 van het wiekprofiel. De zwaarte van de roede wordt mede
 bepaald door de van te voren vastgestelde uiterlijke af-
 metingen. Voor de belastingen door het eigen gewicht zal
 een schatting gemaakt dienen te worden. Met de ervaring

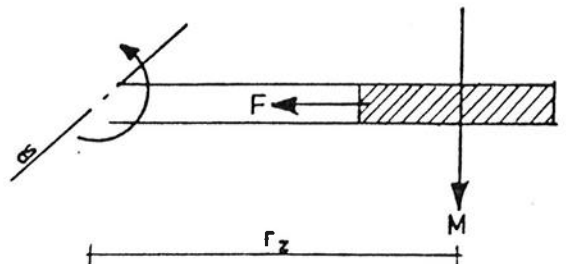
met oude roeden is deze schatting zeer goed mogelijk.
Achteraf dient deze belasting gecontroleerd te worden.

5.3. Centrifugale kracht

De maximale centrifugale kracht treedt op bij de as.
In een doorsnede geldt:

$$F = m \omega^2 r_z$$

waarin: F = de centrifugale kracht
 m = massa geconcentreerd in het zwaartepunt van het gearceerde gedeelte
 r_z = afstand van de as tot het zwaartepunt van het gearceerde gedeelte



Figuur 9 : centrifugale kracht

5.4. Spanningen tijdens het vangen

De omtreksnelheid van een punt op de roede is $u_r = \omega \cdot r$

Indien r_z de afstand is van het zwaartepunt van de halve roede tot de as, dan is $u_r = \omega \cdot r_z$

Bij een vertraging van a m/sec² is de snelheid van een punt na t seconden: $v_t = v_0 + at = 0$, waaruit volgt,

$$\text{dat } a = -\frac{v_0}{t} = -\frac{\omega \cdot r_z}{t}$$

De afgelegde weg (x) van het zwaarte punt bedraagt na t sec: $x = \frac{1}{2} at^2 + v_0 t = -\frac{1}{2} \omega \cdot r_z \cdot t + \omega \cdot r_z \cdot t = \frac{1}{2} \omega \cdot r_z \cdot t$

Zodra bepaald is wat de lengte van de remweg is tijdens het vangen (x) kan bij de aangenomen hoeksnelheid ω de remtijd t worden bepaald:

$$x = \frac{1}{2} \omega \cdot r_z \cdot t \rightarrow t = \frac{2 \cdot x}{\omega \cdot r_z}$$

De optredende remkracht is dan:

$$k = \frac{m \cdot v}{t} = m \cdot \omega \cdot r_z \cdot \frac{\omega \cdot r_z}{2x} = \frac{m \cdot r_z^2 \cdot \omega^2}{2 \cdot x}$$

Indien de remweg één omwenteling bedraagt is
 $x = 2\pi \cdot r_z$

Bij een gang van 100 enden per min is de hoeksnelheid
 $= \frac{2\pi \cdot 100 \cdot \frac{1}{4}}{60} = 2,62 \text{ rad/sec}$

dus: $k = \frac{m \cdot 2,62^2 \cdot r_z^2}{2 \cdot 2\pi \cdot r_z} = 0,545 \text{ m} r_z$

Het moment ter plaatse van de as bedraagt dan:

$m = r_z \cdot k = 0,545 \cdot m \cdot r_z^2$

Voor de berekeningen worden de vangspanningen lineair aflopend aangehouden vanaf de as.

5.5. Berekeningsvoorbeeld

Als voorbeeld wordt gekozen een molenroede met een lengte van 22 m en met een kleinst bekende roedediameter bij de as n.l. 280x330mm.

Gegevens :	lengte roede	22 m
	middenzwaarte	280x330 mm
	hoek maalvlak	14°
	lengte tuigage	9,10 m
	breedte tuigage	2 m
	windvangende breedte (inkl.roede)	2,25 m
	zeeg	zie grafiek 1
	windsnelheid	$v_{\text{wind}} = 13 \text{ m/sec}$
	molensnelheid	100 enden/min

Berekening

De berekening wordt deels analytisch deels grafisch uitgevoerd. De resultaten van deze berekeningen worden deels grafisch, deels tabellarisch weergegeven. Het integreren van b.v. belastingen en dwarskrachten is met de planimeter uitgevoerd.

De volgorde van berekenen is:

1. Bepaling van aerodynamische belasting

- belasting tangentiaal
axiaal
- dwarskracht tangentiaal
axiaal
- moment tangentiaal
axiaal

2. bepaling permanente belasting

- belasting tangentiaal
- dwarskracht tangentiaal
- moment tangentiaal

3. Bepaling trillingsfaktor
 4. Bepaling centrifugaalkracht
 5. Spanningsberekening t.g.v.
bovenstaande belastingen
 6. Spanningen tijdens het vangen
 7. Bepaling toelaatbare dynamische
belasting
 - 8: Kontroleberekening bij hoge gang
 - a. aerodynamische belasting:
 - belasting tangentiaal
axiaal
 - dwarskracht tangentiaal
axiaal
 - moment tangentiaal
axiaal
 - b. spanningsberekening
- 5.5.1. Aerodynamische belasting

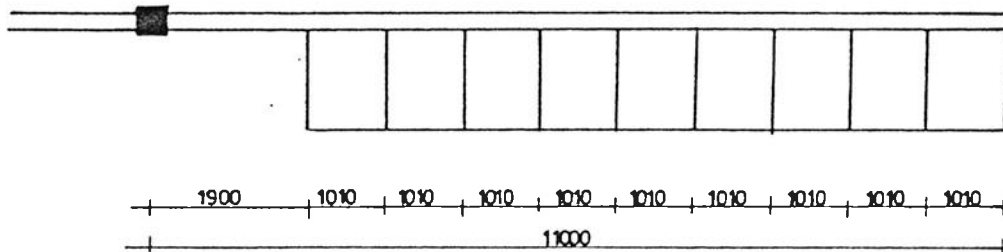
Bij 100 enden per minuut is

$$\omega = \frac{2\pi \cdot 25}{60} = 2,62 \text{ rad/sec}$$

De lift- en weerstandscoefficient c_l en c_w kunnen met behulp van de bijlagen 3 en 4 bepaald worden voor ieder punt op de roede afhankelijk van de invalshoek $\delta = \beta - \alpha$ (c_l volgens lijn c, zie ook 4.12.)

Uit de mechanika is bekend dat de integraal-kromme van de belastingslijn gelijk is aan de dwarskrachtenlijn. De integraal-kromme van de dwarskrachtenlijn is gelijk aan de momentenlijn.

Deze theorie wordt op een praktische manier toegepast. Uitgaande van de belastinglijn wordt langs grafische weg de dwarskrachtenlijn bepaald.



Figuur 10

In de volgende tabellen en grafieken zijn de resultaten voor deze roede samengevat.

Tabel : 1, 2 en 3
Grafiek : 1 t/m 7

5.5.2. Permanente belasting

Het eigen gewicht van de roede met tuigage wordt als volgt bepaald:

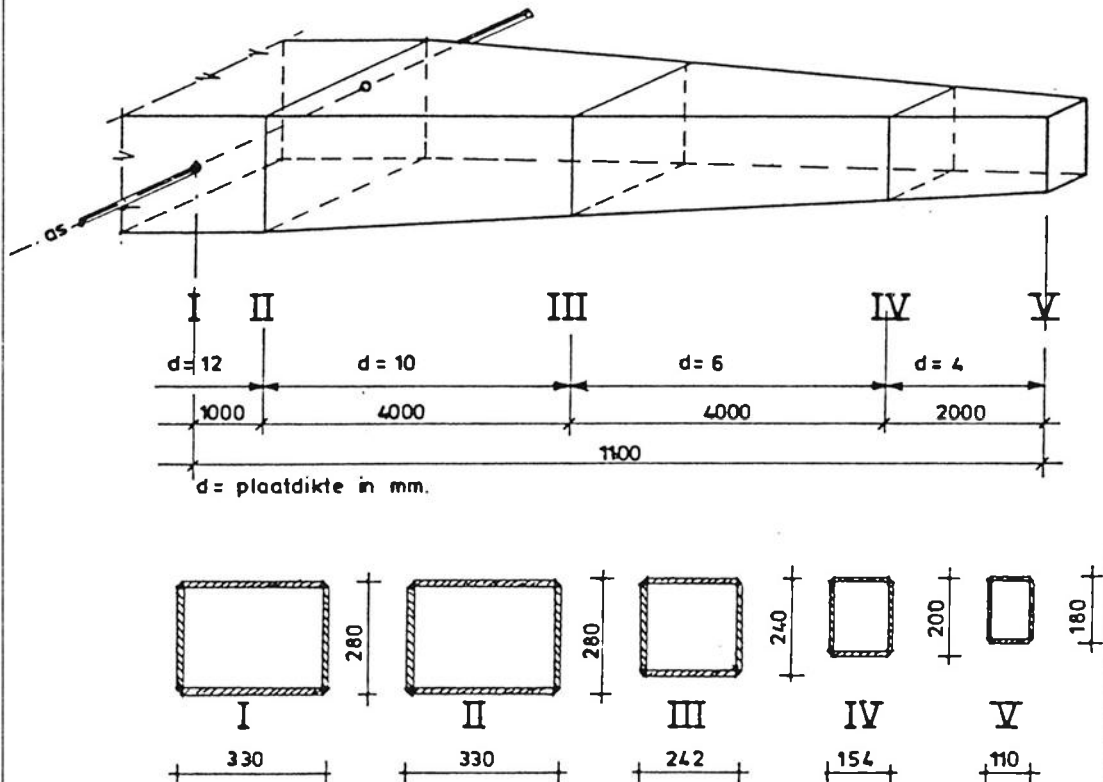
a. Tuigage

gewicht $11,5 \text{ kg/m}^2 = 115 \text{ N/m}^1$
 breedte 2 m
 per m' roede $2 \times 115 = 230 \text{ N/m}^1$

b. Roede

Soortelijk gewicht staal 7900 kg/m^3

De gekozen plaatdikten staan weergegeven in fig. 11.



Figuur 11

In de volgende tabellen zijn de resultaten van de berekening van de invloed van de permanente belasting samengevat

Tabel : 4, 5 en 6

Grafiek : 8, 9 en 10

5.5.3. Bepaling trillingsfaktor

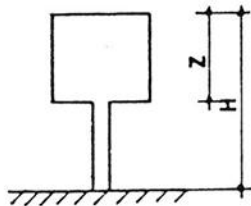
De trillingsfaktor wordt bepaald volgens NEN 3850 art. 2.3. en 2.4.

Hierbij is het noodzakelijk om de verplaatsing van de top van de roede te weten t.g.v. de permanente belasting. Uit de mechanica is bekend dat de integraalkromme van de gereduceerde momentenlijn de hoekverdraaiing geeft en de integraalkromme van de hoekverdraaiing de verplaatsing.

Uit ons voorbeeld: vlucht 22 m
windsnelheid 13 m/s
gang 100 enden/min

verkrijgen we: Het gereduceerde momentenvlak voor de permanente belasting	tab. graf.	16	18
Hoekverdraaiing		17	19
Verplaatsing		17	20

De totale verplaatsing van de top van de roede t.g.v. de permanente belasting $\delta = 28,3 \text{ mm} = 0,0283 \text{ m}$



Zie NEN 3850 en figuur

$$\frac{H}{B} = \frac{22}{2} = 11 > 5$$

$$Z = 9\text{m}$$

Figuur 15

Hieruit volgt dat de:

$$\text{Ruwheidsfactor } r = 0,27 \text{ fig. 3 NEN 3850}$$

$$\text{Vlaagfactor } T_b = 1,90 \text{ fig 4 NEN 3850}$$

$$\text{Stuwdruk op 22m } q = 1132 \text{ N/m}^2 \text{ tab.6 NEN 3850}$$

Hieruit volgt dat:

$$v_u = 1,25 \cdot \sqrt{\frac{q}{1+4 \cdot r \cdot \sqrt{T_b}}} = 1,25 \cdot \sqrt{\frac{1132}{1+4 \cdot 0,27 \cdot \sqrt{1,9}}} = 26,7$$

$$\text{De eigen frequentie : } f_e = \sqrt{\frac{0,25}{\delta}} = \sqrt{\frac{0,25}{0,0283}} = 2,97$$

$$\frac{v_u}{f_e} = \frac{2,97}{26,7} = 0,11$$

Fig. 5 NEN 3850 : $F_D = 0,038$
 $F_L = 0,015$

$$\left. \begin{aligned} \frac{B}{Z} &= \frac{2}{9} = 0,22 \\ \frac{f_e}{v_u} \cdot Z &= 0,11 \cdot 9 = 0,99 \end{aligned} \right\} \text{fig.6 NEN 3850 : } S = 0,19$$

Dan is $T_R = \frac{F_D \cdot S}{D} = \frac{0,038 \cdot 0,19}{0,01} = 0,72$

$T_{R'} = \frac{F_L \cdot S}{D} = \frac{0,015 \cdot 0,19}{0,01} = 0,29$

waaruit volgt, dat de trillingsfaktor:

$$\Phi_1 = \frac{1+4r\sqrt{T_D+T_{R'}}}{1+4r\sqrt{T_D}} = \frac{1+4 \cdot 0,27\sqrt{1,9+0,72}}{1+4 \cdot 0,27\sqrt{1,9}} = 1,10$$

$$\Phi_2 = \frac{4\sqrt{T_{R'}}}{1+4r\sqrt{T_D}} = \frac{4 \cdot \sqrt{0,29}}{1+4 \cdot 0,27 \cdot \sqrt{1,9}} = 0,87 < 1$$

Voor windbelasting evenwijdig aan de windrichting geldt dus, dat deze windbelasting met de factor $\Phi = 1,1$ dient te worden vermenigvuldigd.

Bij grote vluchten (> 22 m) kan het trillingsgetal Φ afwijken van bovenstaande waarde en dient deze van geval tot geval te worden bepaald.

5.5.4. Centrifugaalkracht

De optredende kracht kan eenvoudig bepaald worden uit:

$$F = m\omega^2 r_z \\ = 864,9 \cdot 2,62^2 \cdot 4,49 = 26657 \text{ kg m/sec}^2 = 26657 \text{ N}$$

Oppervlakte in de doorsnede ter plaatse van de as
 $= 13488 \text{ mm}^2$

$$\tau = \frac{26657}{13488} = 1,98 \text{ N/mm}^2$$

In de berekening kan deze spanning lineair aflopend worden aangehouden

5.5.5. Spanningsberekening

Voorbeeld: vlucht 22 m, $v_{\text{wind}} = 13 \text{ m/sec}$, gang 100 enden/min.
traagheidsmomenten (I) en de weerstandsmomenten (W) van de voorgestelde roede zie tabel 7 en grafiek 11.

Momenten t.g.v. de wind: tangentiaal 19040Nm
axiaal 65830Nm

Momenten t.g.v. permanente belasting:
tangentiaal $38800 \cdot \cos 14^\circ = 37647\text{Nm}$
axiaal $38800 \cdot \sin 14^\circ = 9387\text{Nm}$

Trillingsfaktor $\phi = 1,1$

Ter plaatse van de as zijn de spanningen:

$$\begin{aligned} \text{-tangentiaal } \tau &= \frac{(37647+19040) \cdot 10^3}{1182 \cdot 10^3} = 48,0 \text{ N/mm}^2 \\ \text{-axiaal } \tau &= \frac{(65830+9387) \cdot 10^3}{1289 \cdot 10^3} = \frac{58,4 \text{ N/mm}^2}{106,4 \text{ N/mm}^2} \end{aligned}$$

De spanningen in de overige doorsneden zijn berekend in tabel 8.

De toelaatbare dynamische spanning $= 151 \text{ N/mm}^2$

5.5.6. Spanning tijdens het vangen

$$M = 0,545 m r_z^2 \text{ (100 enden per minuut)} \\ = 0,545 \cdot 865 \cdot 4,49^2 = 9504 \text{ kg m}^2/\text{sec}^2 = 9504 \text{ Nm}$$

De spanningen ter plaatse van de as bedragen:

$$\tau = \frac{9504 \cdot 10^3}{1182 \cdot 10^3} = 8,04 \text{ N/mm}^2$$

De totale spanning bedraagt tijdens het vangen:

$$\tau = 108,4 + 8,0 = 116,4 \text{ N/mm}^2$$

Voor de berekening worden de vangspanningen lineair aflopend aangehouden (zie tabel 8).

5.5.7. Bepaling toelaatbare dynamische belasting

5.5.7.1. Berekening volgens de V.O.S.B. 1963

Belasting maximaal: $19040 + 37647 = 56687 \text{ Nm}$
minimaal: $-37647 + 19040 = -18607 \text{ Nm}$

$$\text{Dus } \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{M_{\min}}{M_{\max}} = \frac{-18607}{56687} = 0,33$$

NEN 1008 (V.O.S.B. 1963) art. 69, geeft bij een lascoëfficiënt $\xi = 1$ een toelaatbare $\bar{\sigma}_t = 134,4 \text{ N/mm}^2$
en $\bar{\sigma}_d = 152,2 \text{ N/mm}^2$

5.5.7.2. Berekening volgens "stress-range" curve

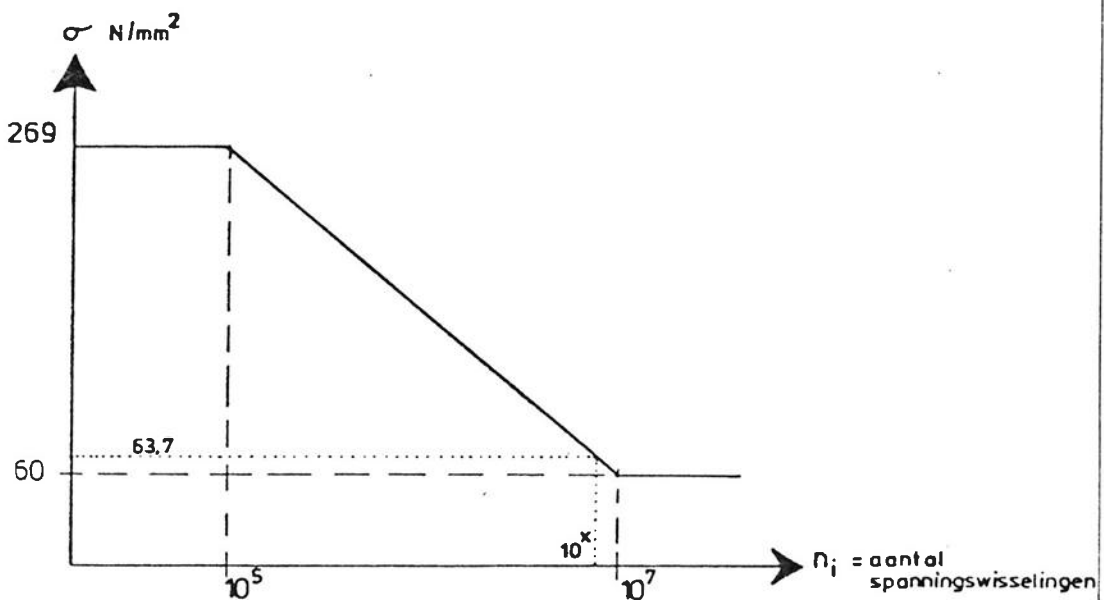
De "stress-range" S van de voorbeeldroede bedraagt:

$$\sigma_{\max} = \frac{56687 \cdot 10^3}{1182 \cdot 10^3} = 47,96 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\min} = \frac{-18607 \cdot 10^3}{1182 \cdot 10^3} = -15,74 \text{ N/mm}^2$$

$63,70 \text{ N/mm}^2$

Voor een stompe las wordt de S-N grafiek vermoedelijk als volgt:



Aangezien het te verwachten aantal spanningswisselingen groter zal zijn dan 10^7 dient de "stress-range" tot 60 N/mm^2 beperkt te blijven.

Dit kan door het weerstandsmoment W_x te verhogen tot $\pm \frac{63,7}{60} \cdot 1182 \cdot 10^3 \approx 1255 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$.

In termen van toelaatbare belastingen betekent dit een verlaging van de $\bar{\sigma}$ tot $160 \cdot \frac{60}{63,7} = 151 \text{ N/mm}^2$.

Volgens Guerney (zie literatuur) zou het aantal wisselingen, waarbij een $S = 63,7 \text{ N/mm}^2$ toelaatbaar is, als volgt kunnen worden berekend:

$$\log N = \log a - d \cdot s_t + m \cdot \log S$$

Hetgeen in ons geval voor een stompe las (type F) betekent, dat: $\log a = 12,2370$

$$-3 \log 63,7 = -5,41$$

$$s_t = 0,2183 \text{ (standaarddeviatie)}$$

terwijl bij een kans op breuk van 2,3% de faktor $d = 2,0$. Hieruit volgt dat $\log N = 6,4$ dat wil zeggen, dat bij minder dan $10^{6,4}$ spanningswisselingen een $S = 63,7 \text{ N/mm}^2$ aanvaardbaar is.

Het is duidelijk, dat de optredende "stress-range" S dichtbij de ondergrens van 60 N/mm^2 ligt, waarbij de konstruktie ongevoelig is voor vermoeiing.

Voor de berekening zal dan ook worden uitgegaan van een toelaatbare spanning $\bar{\sigma} = 151 \text{ N/mm}^2$.

5.5.8. Kontrole-berekening bij hoge gang

De controle-berekening zal worden uitgevoerd op het voorbeeld:

-vlucht 22m, v_{wind} 13m/s, gang 140 enden/min

Voor de overige gegevens zie voorgaande berekening.

Belastingen t.g.v. de wind:

-tangenciaal	tabel 9	grafiek 12
-axiaal	tabel 9	grafiek 13

Dwarskrachten t.g.v. de wind:

-tangenciaal	tabel 10	grafiek 14
-axiaal	tabel 10.	grafiek 15

Momenten t.g.v. de wind:

-tangenciaal	tabel 11	grafiek 16
-axiaal	tabel 11	grafiek 17

Overzicht maximale spanningen in de kritieke doorsneden tabel 12.

De hoge gang zal slechts zeer zelden voorkomen. Het afremmen dient in dat geval uiterst voorzichtig te geschieden. Voor deze extreme zeldzame situatie mag ons inziens een hogere $\bar{\sigma}$ worden geaccepteerd. Wij stellen voor de waarde $1,25 \times \bar{\sigma}$ als uiterste spanning te accepteren (vlgs art. 22 van de V.O.S.B. 1963) = $\pm 185 \text{ N/mm}^2$. Tot $\pm 22 \text{ m}$ vlucht is de hoge gang dan niet maatgevend. Bij roeden langer dan 22 m zal de nominale draaisnelheid van de molen geleidelijk aan afnemen en daarmee ook de kans op deze hoge snelheden.

Dit rekenvoorbeeld geeft lage spanningen in de verschillende doorsneden, en de roede kan dus nog economischer worden gedimensioneerd.

Bij de definitieve roedekeuze is gestreefd naar een zo laag mogelijk eigen gewicht.

Het definitieve konstruktieschema is getekend in bijlage VII.

De berekening van de bijbehorende spanningen is niet in dit rapport opgenomen.

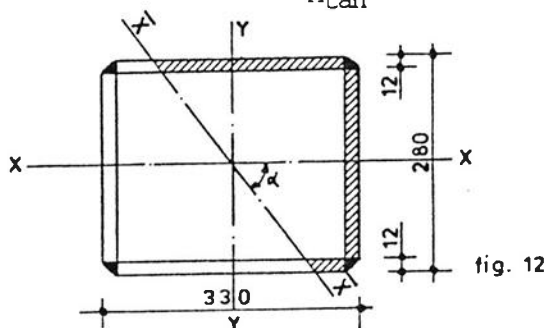
6. Buiten de berekening gelaten invloeden

6.1. Invloed van de dwarskracht

Als voorbeeld wordt de dwarskracht bepaald in de doorsnede t.p.v. de as van onze 22 m-roede.

Dwarskracht totaal tangenciaal: $2785 + 8649 \cos 14^\circ = 11177 \text{ N}$
 Dwarskracht totaal axiaal : $8430 + 8649 \sin 14^\circ = 10522 \text{ N}$
 Moment totaal tangenciaal: $19040 + 37647 = 56687 \text{ Nm}$
 Moment totaal axiaal : $65830 + 9387 = 75217 \text{ Nm}$

De neutrale lijn \bar{x} ligt dan onder een hoek α met de x-as, waarbij $\alpha = \arctan \frac{M_{ax}}{M_{tan}} = 53^\circ$



$$I_x = 16551 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$I_y = 21271 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$\text{Hieruit volgt } I_{\bar{x}} \approx \frac{16551 + 21271}{2} + \left(\frac{16551 + 21271}{2} \right) \cos 2 \cdot 53^\circ =$$

$$\approx 19562 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Het statisch moment van het afgeschoven (gearceerde) gedeelte $S_{\bar{x}} \approx 725137 \text{ mm}^3$

De breedte $b = 2 \cdot 12 / \cos 53^\circ = 39,88 \text{ mm}$.

De samengestelde dwarskracht $D =$

$$\sqrt{D_{tan}^2 + D_{ax}^2} = \sqrt{11177^2 + 10522^2} = 15351 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{D \cdot S}{B \cdot I} = \frac{15351 \cdot 725137}{39,88 \cdot 19562 \cdot 10^4} = 1,43$$

De max. toelaatbare schuifspanning $= 0,58 \cdot 130 = 75 \text{ N/mm}^2$

De invloed op de totaalspanning:

$$\sigma_c = \sqrt{116,4^2 + 3 \cdot 1,43^2} = 116,43 \text{ N/mm}^2$$

De toename door de dwarskracht is 0,02% van de totaalspanning en is te verwaarlozen.

6.2. Invloed van de wringing

Het maximale wringmoment is t.g.v. de permanente belasting:

$$M_{wr} \approx D_{axiaal} \cdot \frac{b}{2} = 8649 \sin 14^\circ \cdot \frac{2}{2} = 2092 \text{ Nm}$$

Het maximale wringmoment t.g.v. de wind:

$$M_{wr} \approx D_{axiaal} \cdot \frac{b}{2} = 8430 \cdot \frac{2}{2} = \underline{8430 \text{ Nm}}$$

Totaal M_{wr} 10522 Nm

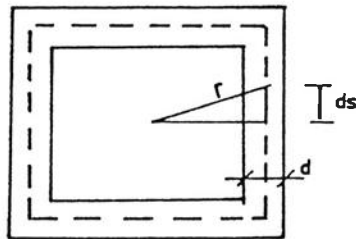
Voor dunwandige buisprofielen geldt het principe van de Saint Venant.

$$M_{wr} = \tau_{wr} \cdot s \cdot 2 \cdot A_0$$

Waarin τ_{wr} = wringspanning

s = plaatdikte

A_0 = het oppervlak omsloten door de hartlijn.



Figuur 13

$$10522 \cdot 10^3 = \tau_{wr} \cdot 12 \cdot 2 \cdot (318.268)$$

$$\tau = 5,1 \text{ N/mm}$$

De invloed van de schuifspanning t.g.v. de wringing op de totale spanning:

$$\sigma_c = \sqrt{116,4^2 + 3 \cdot 5,1^2} = 116,73 \text{ N/mm.}$$

De toename door dwarskracht is 0,29 % van de toelaatbare spanning. Deze invloed is verwaarloosbaar.

Tevens hebben wij een roede met relatief dunne platen gecontroleerd. (De berekening hiervan is niet in dit rapport opgenomen). Het betreft een roede met een vlucht van 15 m en een middenzwaarte van 260 x 200 mm. De plaatdikte tot op 1 m van de as is 4 mm.

Het totale wringmoment t.g.v. de permanente belasting + wind (bij 140 end/min.) = $M_{wr} = 4745 \text{ Nm}$.

$$\text{Hieruit volgt: } \tau_{wr} = \frac{4745000}{256 \times 196 \times 4 \times 2} = 11,81 \text{ N/mm}^2.$$

De max.spanning wordt dan: $\sigma_{tot} = 148 + 11,81 = 159,81 \text{ N/mm}^2$, hetgeen een toename van 8% betekent. De totale spanning blijft ruimschoots onder de toelaatbare spanning (= 185 N/mm^2).

6.3. Kracht van Coriolis

De kracht van Coriolis is maximaal als de wieken zich bevinden in de verticale stand. De Corioliskracht is 0 in de horizontale stand van de wieken. De kracht is axiaal gericht. De grootte van de kracht is:

$$K_c = 2 m \omega_{aarde} \cdot v$$

$$m = 865 \text{ kg}$$

$$v_{zwaartepunt} = 2,62 \cdot 4,49 = 11,76 \text{ m/s}$$

$$\omega_{aarde} = \frac{2\pi \cdot 1}{24 \cdot 3600} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s}$$

$$K_c = 2 \cdot 865 \cdot 7 \cdot 10^{-5} \cdot 11,76 = 1,4 \text{ N.}$$

Moment t.g.v. de corioliskracht = $1,4 \cdot 4,49 = 6,3 \text{ Nm}$

Spanning t.g.v. corioliskracht = $\tau = \frac{6,3 \cdot 10^3}{1289 \cdot 10^3} = 0,0049 \text{ N/mm}^2$

De invloed van de corioliskracht is te verwaarlozen.

6.4. Invloed 2e orde effecten

Tweede orde effecten, d.w.z. krachten die ontstaan t.g.v. de vervorming van de constructie, worden verwaarloosd aangezien deze krachten in een molenroede erg klein zijn en bovendien optreden in een niet maatgevende belastingssituatie. (zie 6.11)

6.5. Niet loodrecht door de wind belast maalvlak

Indien een maalvlak niet loodrecht door de wind belast wordt is de loodrecht ontbonden kracht op het maalvlak kleiner als de windkracht zelf. De krachten zijn dan kleiner als bij loodrechte belasting. Deze invloed kan dus buiten beschouwing worden gelaten.

6.6. Krachten op het wiekenkruis in rust

De invloed van de wind op een stilstaande molen, bij vol zeil, wordt weergegeven in tabel 13. De windsnelheid is hierbij 13 m/s. Uit de berekening volgt in vergelijking met de draaiende molen, zie ons voorbeeld 22m-roede in tabel 15 windsnelheid 13 m/s en een gang van 100 enden/min, dat de krachten bij een stilstaande molen beduidend kleiner zijn als bij een draaiende molen.

Een globale vergelijking geeft:

Tabel 1 : gemiddelde tangentiale kracht	310 N/m
axiale kracht	972 N/m
Tabel 13 : gemiddelde tangentiale kracht	131 N/m
axiale kracht	282 N/m

Toename krachtfactor van de totale kracht tussen stilstand en draaiende toestand : $\frac{310+972}{131+282} = 3,1$

Bij een toename van de windsnelheid van $\sqrt{3,1 \cdot 13^2} = 22,9 \text{ m/s}$ zal de kracht op de stilstaande molen ongeveer gelijk zijn als de kracht op de draaiende molen bij vol zeil.

Kontrolle: $M_{\text{tang}} \approx 3,1 \cdot 131 \cdot 9 \cdot (4,5 + 2) = 23757 \text{ Nm}$

$M_{\text{maxiaal}} \approx 3,1 \cdot 263 \cdot 9 \cdot (4,5 + 2) = 47695 \text{ Nm}$

$$\text{Tangentiaal: } \sigma = \frac{(21587 + 37647) \cdot 10^3}{1182 \cdot 10^3} = 52 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Axiaal: } \sigma = \frac{(47695 + 9387) \cdot 10^3}{1289 \cdot 10^3} = \frac{44 \text{ N/mm}^2}{96 \text{ N/mm}^2}$$

6.7. Invloed biljoening

Binnen beperkte grenzen, 40 à 50mm, is biljoening zonder meer toe te passen. De biljoening wordt toegepast in de relatief slappe richting van de platen. De spanningen die door de biljoening optreden zijn zeker niet groter de spanningen t.g.v. het lassen van de platen. Bovendien staan de spanningen t.g.v. de biljoening loodrecht op de hoofdspanningen, hetgeen voor de uiteindelijke spanning gunstig is. Indien de biljoening grote vormen aanneemt en wel groter dan 50 mm dient men zich hiervan rekenschap te geven, ondermeer van de vermindering van weerstandsmomenten en traagheids-grootheden.

6.8. Invloed van zelfzwichtende jalouziewieken en andere wiekvormen

Bijzondere wiekvormen d.w.z. anders dan de konventio-nele vorm, behoeven geen andere berekeningsmethoden. Verschillen zijn er alleen in de permanente belasting en liftcoëfficiënt (zie 4.12.) van de verschillende wieksystemen. Een gunstige invloed bij zelfzwichters, b.v. wieken met jalouzieën en wieken met het vleugel-profiel van Bilau is, dat zwichten ten alle tijden mogelijk is terwijl de wieken draaien.

6.9. Invloed hekgaten

De invloed van de hekgaten op de traagheidsmomenten en weerstandsmomenten in de doorsnede van de roede zijn klein. Men moet zich er echter van bewust zijn, dat bij een doorsnede waarin zich een hekgat bevindt span-ningsconcentraties kunnen voorkomen, die mede door eventuele kerfwerking bij de hekgaten in de dynamisch belaste roedekonstruktie aanleiding kunnen zijn tot het ontstaan van een vermoeiingsscheur.

In de praktijk dienen de hekgaten zorgvuldig te wor-den uitgevoerd met voldoende afgeronde hoeken om het ontstaan van vermoeiingsscheuren tot een minimum te beperken.

6.10. Temperatuursinvloeden

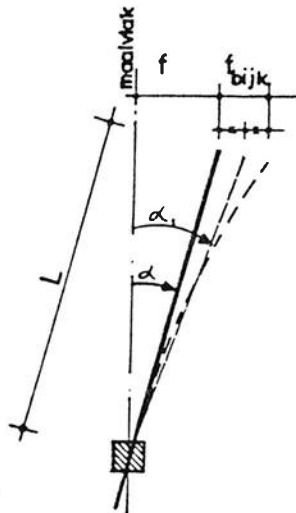
Temperatuursinvloeden op de roede kunnen nagenoeg geen spanningen veroorzaken aangezien de roede vrij kan ver-vormen. De vervorming kan alleen invloed hebben op een tweede orde effekt. Aangezien een tweede orde effekt

te verwaarlozen is zijn de temperatuursverschillen tevens te verwaarlozen.

6.11. Invloed doorbuiging heklatten

De zeeg α van de wieken is een voor de molen vaststaand gegeven (zie ook 4.10.).

Deze zeeg bepaald mede de optredende lift- en weerstandskracht op de roede. Onder invloed van deze weerstandskracht zullen de heklatten echter doorbuigen, zodat de totale scheefstand van de heklatten groter wordt. We kunnen zeggen dat de oorspronkelijke zeeg = α de waarde α_1 ($>\alpha$) krijgt, bij volledige belasting van de wieken. De invloed van deze doorbuiging op de spanningen in de roede kan als volgt worden benaderd:



$$\text{stel } \alpha_1 = \arcsin\left(\frac{f + f_{\text{bijk}}}{L}\right)$$

waarbij: $f = L \cdot \sin \alpha$

$$f_{\text{bijk}} = \frac{q \cdot l^4}{8 EI} \text{ (elast. doorb.)}$$

q = axiale kracht per m^1 op de heklat

L = zeilbreedte

Reken hierbij de heklat volledig ingeklemd in de roede

Figuur 14

In ons voorbeeld is :	vlucht	22 m
	zeilbreedte	1,60 m
	voorhekbreedte	0,40 m
	windvangende breedte	2,25 m
	heklatten 55 x 45 mm, h.o.h	360 mm

De axiale kracht A op de roede volgt uit tabel 1 en is min 340 N/m^1 en max 2014 N/m^1

$$\text{Per heklat wordt } q = \frac{0,36 \cdot A}{2,25} = 0,16 A \text{ N/m}^1$$

$$\text{Heklatten } \varnothing 55 \times 45 \quad I_x = \frac{1}{12} \cdot 55 \cdot 45^3 = 417656 \text{ mm}^4$$

$$E = 11000 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{\text{bijk}} = \frac{q \cdot L^4}{8 \cdot E \cdot I} = \frac{0,16 \cdot A \cdot 10^3 \cdot 1600^4}{8 \cdot 11000 \cdot 417656} = \frac{A}{35,05} \text{ mm}$$

$$\frac{f_{\text{bijk}}}{2} = \frac{A}{70,1} \text{ mm} \quad f = 1600 \cdot \sin \alpha$$

De waarde van A, α , f, $\frac{1}{2}f_{\text{bijk}}$ en α , zijn opgenomen in tabel 14

De hieruit voortvloeiende waarden voor de lift- en weerstandskracht volgen uit tabel 15

De krachten T en A vergeleken met tabel 14 geven de volgende afwijkingen:

T gemiddelde toename =	1,61%
A gemiddelde reductie =	1,85%

en kunnen worden verwaarloosd in de totale berekening.

Wel blijkt dat de molen uit de aard van de konstruktie een zekere reserve heeft tegen overbelasting.

Bij volle belasting zullen de liftkrachten gemiddeld iets toenemen en de relatief grote weerstandskrachten worden gereduceerd. Dit verschijnsel wordt in geringe mate nog versterkt door de hoekverdraaiing door wringing van de roede zelf.

6.12. Omhullende lift- en weerstandcoëfficiënt en trillingsgetal

Naast de gunstige invloed van de doorbuiging van de heklatten zijn in de keuze van bovengenoemde omhullende en trillingsgetal ook een geringe reserve besloten.

6.13. Vervorming tijdens de montage

Gekontroleerd is, of er tijdens de montage van de roede (= het steken in de askop) kans bestaat op een blijvende vervorming. Om een eenvoudige controle uit te kunnen voeren is de roede geschematiseerd tot een holle prismatische staaf, die op knik wordt gecontroleerd.

De uitgangspunten voor de berekening zijn:

1. De roede is in horizontale positie.
2. De roede is aan de toppen opgelegd.
3. De drukkracht is 2 x het eigen gewicht
4. Roedegegevens: vlucht 15 m
middenzwaarte 260 x 200 mm
plaatdikte = 8 mm, resp. 4 mm.
5. Voor doorsnedeberkening uitgaan van konstante doorsnede van 200 x 200 mm met plaatdikte van 4 mm.

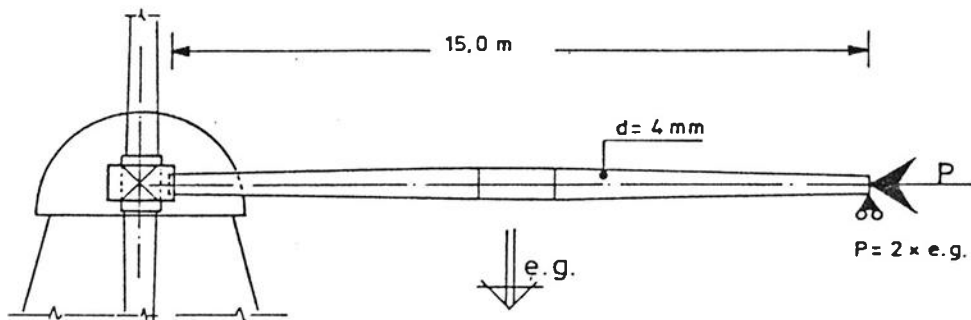


fig. 15

$$\left. \begin{array}{l} M_{eg} = 7890,58 \text{ Nm} \\ W_{min} = 241 \text{ cm}^3 \end{array} \right\} \sigma_{eg \text{ midden}} = 33 \text{ N/mm}^2 \text{ (= werkelijke spanning)}$$

$$\text{E.g. roede} = 360 \text{ kg} \rightarrow F_{druk} = \frac{2 \times 360}{100} = 7,2 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{array}{l} I_{fiktief} = 2008 \text{ cm}^4 \\ A_{fiktief} = 3136 \text{ mm}^2 \end{array} \right\} \rightarrow \lambda = \frac{15000}{80} = 187 \rightarrow \omega = 6,7$$

$$\rightarrow \sigma_{optr} = 6,7 \times \frac{7200}{3136} + 33 = 48,38 \text{ N/mm}^2 \ll 240.$$

De optredende spanning is zoveel lager dan de vloeispanning, dat een blijvende vervorming niet mag worden verwacht. Wel wordt er dan steeds uitgegaan van een statisch belaste konstruktie.

In de praktijk zal het monteren van de roede met de nodige voorzichtigheid moeten gebeuren en moeten schokken en trillingen in de roede worden vermeden.

7. Berekening overige onderdelen

7.1. Kontrolle wiekenas

Als uitgangspunt voor een globale asberekening kiezen we het voorbeeld: 22 m roede

$$v_{wind} = 13 \text{ m/s}$$

$$\text{gang } 100 \text{ enden/min.}$$

Wringend moment M_{wr} bij de as t.g.v. de wind:

$$M_{wr} \approx 4 \cdot M_{tangenciaal} = 4 \cdot 19040 = 76160 \text{ Nm}$$

Wringend moment t.g.v. het vangen bij één omwenteling: (zie 5.5.)

$$\underline{9504 \text{ Nm}}$$

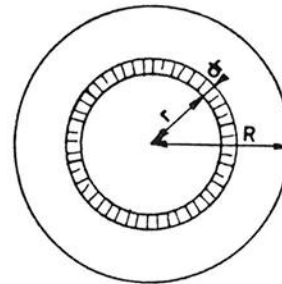
$$\text{Totaal } 85664 \text{ Nm}$$

Stel as-diameter 250 mm = 2R

$$\tau = \frac{M_{wr} R}{I_p}$$

$$I_p = \int_0^R r^2 \cdot 2\pi r dr$$

$$= \frac{1}{2} \pi R^4$$



Figuur 16

Schuifspanningen:

t.g.v. de wind :

$$\tau = \frac{76160 \cdot 10^3 \cdot 125}{\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 125^4} = 24,8 \text{ Nmm}^2$$

t.g.v. vangen :

$$= \frac{9504 \cdot 10^3 \cdot 125}{\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 125^4} = \frac{3,1 \text{ Nmm}^2}{27,9 \text{ Nmm}^2}$$

De toelaatbare schuifspanning van gietijzer kan gesteld worden op $\bar{\tau} = 20 \text{ N/mm}^2$

De toelaatbare schuifspanning wordt hier met een faktor $\frac{27,9}{20} = 1,4$ overschreden. Hiervan maakt de schuifspanning t.g.v. het vangen $\frac{3,1}{20} \cdot 100 = 15\%$ uit van de toelaatbare schuifspanning.

Bij het vangen in een $\frac{1}{4}$ omwenteling, één end, wordt de schuifspanning t.g.v. het vangen $\tau = 4 \cdot 3,1 = 12,4 \text{ N/mm}^2$

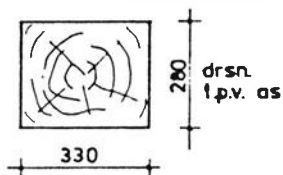
Dit komt overeen met $\frac{12,4}{20} \cdot 100 = 62\%$ van de toelaatbare schuifspanning.

Ook het ashuis zelf kan een zwakke schakel zijn bij eventuele hoge belastingen.

7.2. Berekening houten roede

Uitgaande van het voorbeeld stalen roede:

7.2.1. gegevens:



Figuur 17

vlucht	22m
hoek maalvlak	13°
lengte tuigage	9,10m
breedte tuigage	2,0 m
windvangende breedte	2,25m
zeeg	grafiek 1
windsnelheid	13 m/s
molensnelheid	100 end/m ³
soortelijke massa hout	5500 N/m ³
roede doorsnede t.p.v. as	330.280
roede doorsnede t.p.v. end	110.180

7.2.2. Aerodynamische belasting

Als in voorbeeld stalen roede: $M_{\text{tangenciaal}} = 19040/1,1 =$
 $= 17309$
 $M_{\text{maxiaal}} = 65830/1,1 =$
 $= 59845$

De trillingsfactor voor een stalen roede is $\Phi = 1,1$, terwijl voor hout geen trillingsfactor van toepassing is en wij daarom zijn uitgegaan van $\Phi = 1,0$.

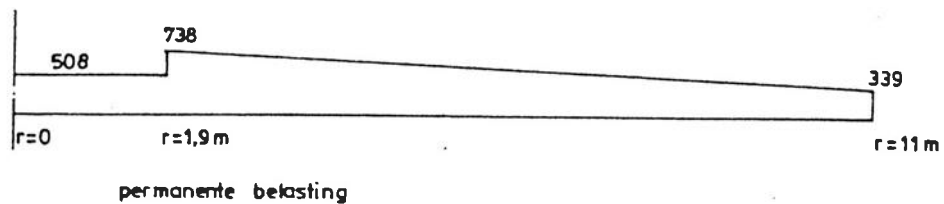
7.2.3. Permanente belasting

T.p.v. de as : eigen gewicht roede = $0,33 \cdot 0,18 \cdot 5500$
 $= 508 \text{ N/m}$

T.p.v. $r = 1,9$: eigen gewicht roede = 508 N/m^1
 tuigage = 230 N/m^1
 738 N/m^1

T.p.v. end : eigen gewicht = $0,11 \cdot 0,18 \cdot 5500 = 109 \text{ N/m}^1$
 : tuigage 230 N/m^1
 339 N/m^1

Stel de belastingvermindering is lineair tussen
 $1,9 < r < 11$



Figuur 18

$$M_{\text{max}} = 508 \cdot 1,9^2/2 + 339 \cdot 9,1 (1,9 + 19,1/2) + (738-339) \cdot 9,1/2 \cdot (9,1/3 + 1,9) = 29771 \text{ Nm}$$

$$M_{\text{tangenciaal}} = 29771 \cos 14 = 28886 \text{ Nm}$$

$$M_{\text{axiaal}} = 29771 \sin 14 = 7202 \text{ Nm}$$

$$M_{\text{tot tang.}} = 17309 + 28886 = 46195 \text{ Nm}$$

$$\sigma = \frac{46195 \cdot 10^3}{4312000} = 10,71 \text{ N/mm}^2$$

$$M_{\text{tot axiaal}} = 59845 + 7202 = 67047 \text{ Nm}$$

$$\sigma = \frac{67047 \cdot 10^3}{5082000} = \frac{13,19}{23,9} \text{ N/mm}^2$$

7.2.4. Centrifugaalkracht:

$$m = 5866 \text{ N} = 587 \text{ kg}$$

$$r = 5,08 \text{ m}$$

$$F = 587 \cdot 2,62^2 \cdot 5,08 = 20469 \text{ N}$$

$$O = 330 \cdot 280 = 92400 \text{ mm}^2$$

$$\text{Spanning } \sigma = \frac{20469}{92400} = 0,22 \text{ N/mm}^2$$

7.2.5. Vangen:

$$M = 0,545 \cdot m \cdot r^2 = 0,545 \cdot 587 \cdot 5,08^2 = 8256 \text{ Nm}$$

$$\text{Spanning } \sigma = \frac{8256 \cdot 10^3}{4312000} = 1,91 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{De totale spanning wordt dan: } 23,9 + 0,22 + 1,91 = 26,03 \text{ N/m}^3$$

Volgens NEN 3852 is de toelaatbare buigspanning $\bar{\sigma}_b$ van hout 7 N/mm^2 ,

De werkelijke breuksterkte van vurehout kan weliswaar een veelvoud hiervan zijn (tot $\sigma_{\text{breuk}} = 70 \text{ N/mm}^2$), maar door onvolkomenheden in het natuurlijk materiaal (hout) moet de optredende spanning in ons voorbeeld als ontoelaatbaar worden beschouwd.

Indien een gelamineerde roede wordt toegepast zal de toelaatbare buigsterkte wat hoger zijn, $\bar{\sigma}_b = 12 \text{ N/mm}^2$, doch de kans op breuk blijft in ons voorbeeld te groot.

7.3. Berekening heklatten

$$\text{De axiale maximum wind-belasting} = \frac{2014}{2,25} = 895 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Windvangende breedte} = 2,25 \text{ m}$$

$$\text{Axiale kracht} \quad \text{zie tabel 1}$$

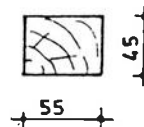
$$\text{Heklatten h.o.h.} \quad 0,36 \text{ m}$$

$$\text{Zeilbreedte} \quad 1,6 \text{ m}$$

$$\text{Dus max.moment per heklat : } M_{\text{max}} = \frac{1}{2} \cdot 895 \cdot 1,6^2 \cdot 0,36 = 412 \text{ Nm}$$

$$W = \frac{1}{6} \cdot 55 \cdot 45^2 = 18562$$

$$\sigma = \frac{412 \cdot 10^3}{18562} = 22,2 \text{ N/mm}^2$$



Hierbij gelden dezelfde opmerkingen als gemaakt bij 7.2.5. Voor heklatten geldt echter, dat de kans op het kunnen verkrijgen van kwalitatief betere houtsoorten groter is, waardoor de kans op breuk wordt verkleind.

De toelaatbare buigspanning van grenen is volgens NEN 3852 $\bar{\sigma}_b = 12 \text{ N/mm}^2$

8. Vergelijking roedeprofielen

8.1. Inleiding

In de volgende vergelijking worden de door ing Knol en ing Weeber berekende roeden alsmede een "pot-roede" vergeleken met het rekenvoorbeeld en de uiteindelijk gekozen roede.

De vergelijking gaat enigszins mank, omdat de doorsnede bij de as niet gelijk is bij de verschillende roeden. De weerstandsmomenten zijn daarom een beter criterium om te vergelijken. De uiteindelijk gekozen roede (waarvan de berekening niet in dit rapport is opgenomen) is met 1065 kg (exkl. tuigage) per roede de lichtste.

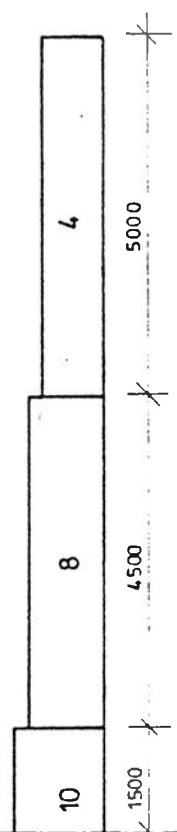
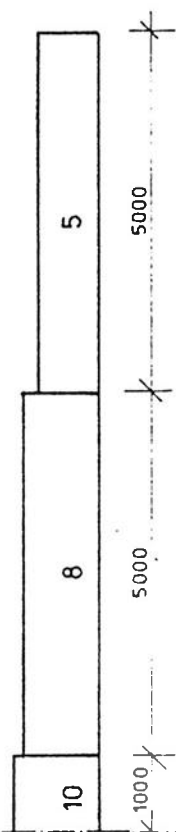
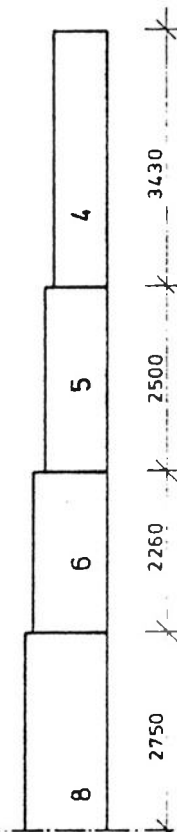
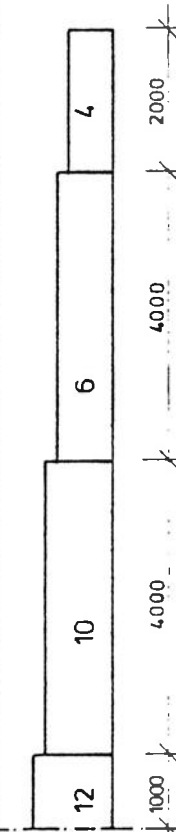
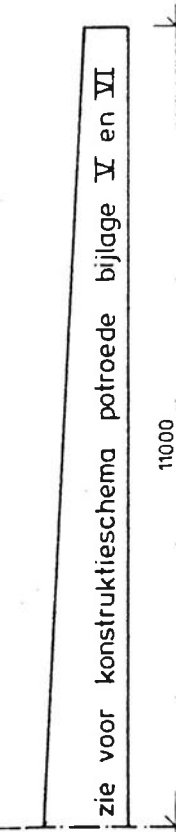
De optredende spanningen in de 22-m potroede zijn door ons bepaald aan de hand van dezelfde windbelasting als het rekenvoorbeeld (dus m.b.v. lijn c van bijlage III). Het resultaat is weergegeven in bijlage VI. Ter vergelijking zijn in bijlage VII de gegevens van de definitieve roede opgenomen.

Tevens hebben wij dezelfde potroede gecontroleerd met behulp van lijn a van bijlage III teheinde deze roede met een 29-m potroede te kunnen vergelijken (zie bijlage VIII en IX).

Opvallend is, dat bij potroeden de veiligheid afneemt bij het langer worden van de roeden.

82. Vergelijking

Vergelijking van roeden volgens verschillende berekeningsmethoden. (vlucht 22 m)

berekening volgens:	bur. Wassenaar definitieve roede	Knol	Weeber	bur. Wassenaar rekenvoorbeeld	" Pot " empirisch bepaald, gecontroleerd a.h.v. methode Wassenaar.
middenzwaarte	330x280	360 x 320	390 x 330	330 x 280	330 x 280
Plaatdikten en -lengten in mm. molenas					
M wind axiaal	65830 Nm	25500 Nm	? Nm	65830 Nm	65830 Nm
M wind tangent.	19040 Nm	8800 Nm	? Nm	19040 Nm	19040 Nm
M perm. axiaal	8238 Nm	2800 Nm	? Nm	9387 Nm	10024 Nm
M perm. tangent.	33044 Nm	38200 Nm	? Nm	37647 Nm	40207 Nm
M totaal axiaal	74068 Nm	33700 Nm	58000 Nm	75217 Nm	75854 Nm
M totaal tangent.	52084 Nm	47000 Nm	55000 Nm	56687 Nm	59247 Nm
W _x tangent	1017 cm ³	1363 cm ³	1190 cm ³	1182 cm ³	967 cm ³
W _y axiaal	1183 cm ³	1453 cm ³	1298 cm ³	1289 cm ³	1150 cm ³
gewicht hele roede (excl tuigage)	± 1065 kg	± 1170 kg	± 1110 kg	± 1274 kg	± 1212 kg

9.

Samenvatting en konklusie

De dimensionering van de roeden is sterk afhankelijk van de bestaande opgelegde afmetingen van de te vervangen roeden.

De konstruktie is vermoeiingsgevoelig, onder meer zijn het soort en de kwaliteit van de las bepalend voor de toelaatbare spanning.

De krachten op de roeden nemen toe met de omwentelingssnelheid van het wiekenkruis.

De roede wordt maximaal belast in de horizontale situatie in neerwaartse beweging.

De permanente belasting heeft een grote invloed op de sterkteberekening.

Bij overbelasten van een wiekenkruis behoeft niet persè de roede het maatgevende onderdeel te zijn voor breuk. In veel gevallen zullen de heklatten of de as eerder maatgevend zijn.

Binnen bepaalde grenzen (40 à 50 mm) is biljoening zonder meer toe te passen.

Wringkrachten, dwarskrachten, krachten van coriolis, 2e orde effecten en een niet loodrecht door de wind belast wiekenkruis zijn invloeden die te verwaarlozen zijn op de uiteindelijke kritieke spanningen.

De doorbuiging van de heklatten biedt een zekere bescherming tegen overbelasting.

Krachten op een molen in rust zijn beduidend kleiner dan op een draaiende molen.

Zelfzwichtende wiekvormen behoeven geen andere rekenkundige benadering. Het verschil met de normale typen is het verschil in permanente belasting en de c_1 -lijn. Een gunstige invloed van zelfzwichtende wiekprofielen is dat op tijd in draaiende toestand gezwicht kan worden.

Er zijn verschillen waar te nemen bij profielen die door andere berekeningsmethoden tot stand zijn gekomen (zie hoofdstuk 8).

De kwaliteit van de uitvoering van de molenroede is medebepalend voor de uiteindelijke sterkte.

Houten roeden kunnen worden toegepast indien men veelvuldige breuk en de bijkomende nadelen van de houten roeden aanvaardt (zie hoofdstuk 8).

Houten roeden komen bij grote vluchten echter niet in aanmerking.

Bij uitwerking bleek de liftcoëfficiënt veel invloed te hebben op het eigen gewicht van de roede. Om extreem zware roeden te vermijden was het gewenst de liftcoëfficiënt nader te specificeren. Dit leidt tot eigen gewichten die aansloten bij de praktijk.

LITERATUURLIJST

- M.Alonso & E.J.Finn Fundamentele Natuurkunde deel I,
Mechanika
Elzevier Amsterdam/Brussel
- A.Betz Wind-Energie und ihre Ausnützung
durch Windmühlen
Göttingen 1925
- K.Bilau Windmolenbouw
Voor Nederland bewerkt door
J.H.Rijnenberg
Eshuis & Co Dalfsen
- Ir C.A.M.Bos Eenvoudige benadering van de
dynamica bij bouwconstructies
Publicatie: uit Bouwen met staal 26
december 1973
- H.Op de Hipt Windmühlen-Praxis
Verlag der Wochenschrift "Die Mühle"
Leipzig
- G.Huslage Windmolens
Keesing Amsterdam
- H.van Kooten & ir C.A.M.Bos Toelichting op de T.G.B. 1972
Publicatie: Instituut T.N.O. voor
Bouwmaterialen en Bouwconstructies
Rijswijk (ZH)
- A.Ronse De Windmolenbouw
C.de Vries-Brouwers
Amsterdam/Antwerpen
- A.Sipman Molenbouw
De Walburg Pers Zutphen
- A.Sipman Molentekeningen
De Walburg Pers Zutphen
- Stichting:
Fonds Landbouw Export
Bureau 1916-1918 Het Prinsenmolenboek
H.Veenman & Zonen Wageningen 1942
- Stichting Houtvoor-
lichtingsinstituut Hout Vademecum deel I
Amsterdam

Ing P.G.Weeber

Het berekenen en vervaardigen van een elektrische gelaste molenroede.
Publicatie: Polytechnisch Tijdschrift P.T. Uitgave A, 6e jaargang 1951 pag. 582a t/m 587a

Ing J.H.Knol

Ontwerpberekeningen voor een stalen molenroede.

Niet gepubliceerd

Uitgebrachte Normen NEN van het Nederlands Normalisatie Instituut Rijswijk (ZH)

Staalbouwkundig
Genootschap

Bouwen met staal

T.R.Gurney

Fatigue design rules for welded steel.

Publicatie: uit The Welding Institute Research Bulletin vol 17, May 1976

Tabellen behorende bij de berekeningsvoorbeelden

Tabel 1	Bepaling lift- en weerstandskrachten	: vlucht 22 m	v_{wind} : 13 m/s	gang: 100 enden/min
"	2 dwarskrachten t.g.v. windbelasting	: vlucht 22 m	v_{wind} : 13 m/s	gang: 100 enden/min
"	3 momenten t.g.v. windbelasting	: vlucht 22 m	v_{wind} : 13 m/s	gang: 100 enden/min
"	4 roedegegevens	: vlucht 22 m	as-doorsnede 330 . 280	-
"	5 dwarskrachten t.g.v. perm. bel.	: vlucht 22 m	as-doorsnede 330 . 280	-
"	6 momenten t.g.v. perm. bel.	: vlucht 22 m	as-doorsnede 330 . 280	-
"	7 traagheidsmomenten en weerstandsmomenten:	vlucht 22 m	as-doorsnede 330 . 280	-
"	8 spanningen in de doorsnede	: vlucht 22 m	as-doorsnede 330 . 280	-
"	9 bepaling lift- en weerstandskrachten	: vlucht 22 m	v_{wind} : 13 m/s	gang: 140 enden/min
"	10 dwarskrachten t.g.v. windbelasting	: vlucht 22 m	v_{wind} : 13 m/s	gang: 140 enden/min
"	11 momenten t.g.v. windbelasting	: vlucht 22 m	v_{wind} : 13 m/s	gang: 140 enden/min
"	12 spanningen in de doorsnede	: vlucht 22 m	as-doorsnede 330 . 280	gang: 140 enden/min
"	13 bepaling lift- en weerstandskrachten	: vlucht 22 m	v_{wind} : 13 m/s	gang: 0 enden/min
"	14 bepaling α , (doorbuiging heklatten)	: vlucht 22 m	v_{wind} : 13 m/s	gang: 100 enden/min
"	15 bepaling lift- en weerstandskrachten	: vlucht 22 m	v_{wind} : 13 m/s	gang: 100 enden/min
"	16 bepaling gereduceerd moment t.g.v. permanente belasting in de windrichting	: vlucht 22 m	v_{wind} : 13 m/s	gang: 100 enden/min
"	17 bepaling hoekverdraaiing t.g.v. permanente belasting in de windrichting	: vlucht 22 m	v_{wind} : 13 m/s	gang: 100 enden/min

Tabel 1

Bepaling Lift- en weerstandskrachten : vlucht: 22 m, v_{wind} : 13 m/s, gang : 100 enden/min.

Omschrijving

Doorsneden

Afstand(r)doorsnede tot de as	(m)	2,41	3,42	4,43	5,44	6,45	7,46	8,47	9,48	10,49
w		2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62
b	(m)	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25
v_{wind}	(m/s)	13	13	13	13	13	13	13	13	13
$u_r = \omega r$	(m/s)	6,31	8,96	11,61	14,25	16,90	19,55	22,19	24,84	27,48
$\beta = \arctg \frac{v}{\omega r}$	(°)	65	56,0	48,0	43,0	37,5	34,0	31,0	27,0	24,5
α	(°)	19,6	20,8	20,2	19,4	18,0	15,0	10,8	5,4	-0,6
$\delta = (\beta - \alpha)$	(°)	45,4	35,2	27,8	23,6	19,5	19,0	20,2	21,6	25,1
c_l		1,11	1,24	1,30	1,31	1,29	1,29	1,30	1,31	1,31
c_w		0,75	0,58	0,48	0,40	0,32	0,32	0,34	0,35	0,42
$\epsilon = \arctg \frac{c_w}{c_l}$	(°)	32,24	25,07	20,07	16,98	13,93	13,93	14,66	14,96	17,78
$\beta - \epsilon$	(°)	32,76	30,93	27,73	26,02	23,57	20,07	16,34	12,04	6,72
$\sin(\beta - \epsilon)$		0,54	0,51	0,47	0,44	0,40	0,34	0,28	0,21	0,12
$\cos(\beta - \epsilon)$		0,84	0,86	0,89	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	0,99
$w = \frac{v_{wind}}{\sin \beta}$	(m/s)	14,31	15,68	17,49	19,06	21,35	23,25	25,24	28,63	31,35
w^2	(m ² /s ²)	205,75	245,89	306,01	363,35	456,03	540,46	637,1	819,96	982,73
$\sqrt{c_l^2 + c_w^2}$		1,31	1,37	1,39	1,37	1,33	1,33	1,34	1,36	1,38
$h_p \times b \times \phi$	(kg s ² /m ³)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
$T = h_p b w^2 \sqrt{c_l^2 + c_w^2} \times \sin(\beta - \epsilon) \times g \times \phi$	(N/m ¹)	218	258	300	329	364	367	359	351	244
$A = h_p b w^2 \sqrt{c_l^2 + c_w^2} \times \cos(\beta - \epsilon) \times g \times \phi$	(N/m ¹)	340	435	568	672	837	1014	1229	1639	2014

Tabel 2 Dwarskrachten t.g.v. windbelasting vlucht: 22m v_{wind}: 13 m/s gang: 100 enden/min.

Omschrijving		doorsneden											
Afstand t.o.v. de as	(m)	0	1	1,9	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tangentiaal D _T	(N)	2785	2785	2785	2580	2320	2020	1700	1340	970	610	280	0
Axiaal D _A	(N)	8430	8430	8430	8080	7650	7120	6450	5620	4600	3370	1850	0

Tabel 3 Momenten t.g.v. windbelasting vlucht: 22m v_{wind}: 13 m/s gang: 100 enden/min.

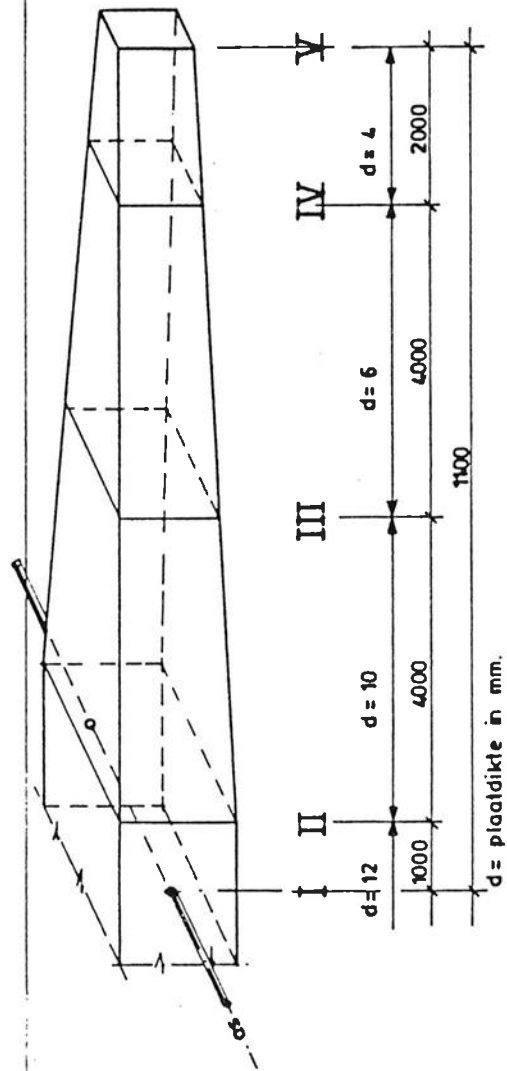
Omschrijving		doorsneden											
Afstand t.o.v. de as	(m)	0	1	1,9	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tangentiaal M _T	(Nm)	19040	16260	13750	10810	8360	5910	4050	2530	1375	585	140	0
Axiaal M _A	(Nm)	65830	57390	49800	40700	32840	25450	18670	12630	7520	3530	920	0

Tabel 4

Roedegegevens

Vlucht 22 m

As-doorsnede 330 x 280 mm



Omschrijving

DOORSNEDEN

I II III IV V

Links (L) of rechts (R) van de doorsneden

	I		II		III		IV		V	
	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L
Afstand t.o.v. de as (m)	0	1	1	5	5	9	9	9	9	11
Breedte uitwending (mm)	330	330	330	242	242	154	154	154	154	110
Hoogte uitwendig (mm)	280	280	280	240	240	200	200	200	200	180
Dikte plaat (d) (mm)	12	12	10	10	6	6	6	6	4	4
Belasting t.g.v. eigen gewicht (N/m ¹)	1111	1111	932	730	446	324	219	219	219	178
Belasting t.g.v. hekwerk (N/m ¹)				230	230	230	230	230	230	230
Belasting totaal permanent (N/m ¹)	1111	1111	932	960	676	554	449	449	449	408

Tabel 5

Dwarskrachten t.g.v. permanente belasting

vlucht: 22 m, as-doorsnede: 330 x 280 mm

Omschrijving

doorsneden

Afstand t.o.v. de as	(m)	0	1	1,9	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Dwarskracht	(N)	8649	7538	6606	5367	4310	3317	2656	2026	1426	857	418	0

Tabel 6

Momenten t.g.v. permanente belasting

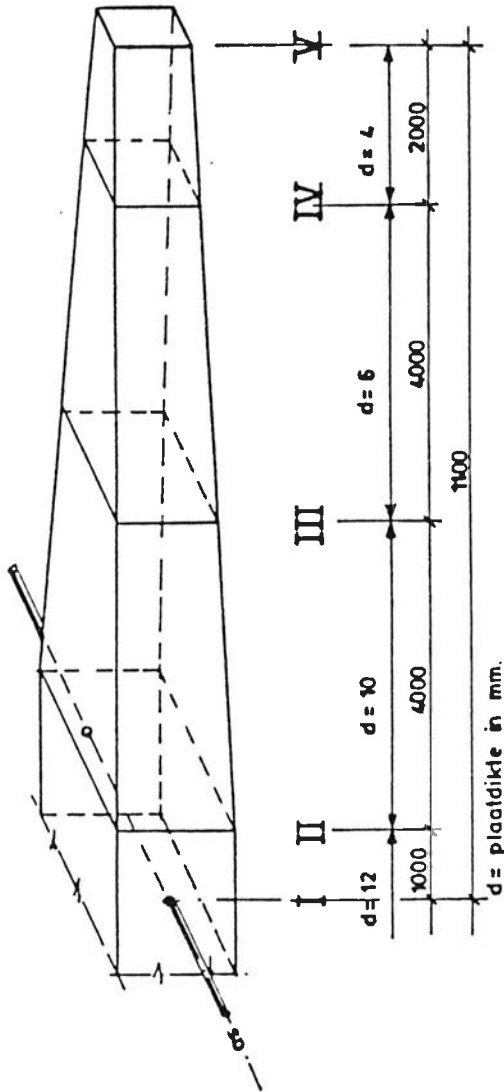
vlucht: 22m, as-doorsnede: 330 x 280 mm

Omschrijving

doorsneden

Afstand t.o.v. de as	(m)	0	1	1,9	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Moment	(Nm)	38800	30800	23700	17700	12900	9000	6100	3700	2000	800	210	0

Tabel 7 Traagheidsmomenten en weerstandsmomenten vlucht: 22m, midden zwaarte 330 . 280 mm



Omschrijving

Doorsneden

Links (L) of rechts (R) van de doorsnede

Afstand t.o.v. de as (m)	R		L		R		L		R		L	
	0	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d		12	10	10	10	10	10	10	10	6	4	4
$I_x \cdot 10^4$ (mm ⁴)	12	16551	14234	10621	7650	4964	3456	2268	1594	1260	971	4
$I_y \cdot 10^4$ (mm ⁴)	21271	21271	18282	12282	7748	5027	2945	1522	1072	724	457	4
$W_x \cdot 10^3$ (mm ³)	1182	1182	1017	817	638	414	314	227	159	133	108	4
$W_y \cdot 10^3$ (mm ³)	1289	1289	1108	859	640	415	297	198	139	110	83	4

Tabel 8 Spanningen in de doorsneden

Vlucht: 22 m, v_{wind} : 13 m/s, gang: 100enden/min, as-doorsnede: 330 x 280 mm

Omschrijving	Doorsneden				
	I	II	III	IV	V
Afstand r t.o.v. de as (m)	0	1	1,9	5	9
M t.g.v. de wind:					
Tangentiaal T (Nm)	19040	16260	13750	5910	585
Axiaal A (Nm)	65830	57390	49800	25450	3530
M t.g.v. permanente belasting:					
Tangentiaal (Nm)	37647	29885	22996	8733	776
Axiaal A (Nm)	9387	7451	5734	2177	194
$W_x \times 10^3$ (mm ³)	1182	1017	910	414	159
$W_y \times 10^3$ (mm ³)	1289	1108	980	415	139
Spanningen Tangentiaal (N/mm ²)	48,0	45,4	40,4	35,4	10,3
Axiaal (N/mm ²)	58,4	58,5	56,7	66,6	26,8
Centrifugaal (N/mm ²)	2,0	1,8	1,7	1,1	0,4
Totaaldynamisch (N/mm ²)	108,4	105,7	98,8	103,1	37,1
Vangspanning (N/mm ²)	8,0	7,3	6,6	4,4	1,5
Totaal + vangen (N/mm ²)	116,4	113,0	105,4	107,5	38,6

Tabel 9

Bepaling Lift- en weerstandskrachten : vlucht: 22 m, v_{wind} : 13 m/s, gang : 140 enden/min.

Omschrijving	Doorsneden									
Afstand r doorsnede tot de as (m)	2,41	3,42	4,43	5,44	6,45	7,46	8,47	9,48	10,49	
w	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	
b	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	
v_{wind} (m/s)	13	13	13	13	13	13	13	13	13	
$u_r = \omega r$ (m/s)	8,84	12,55	16,26	19,96	23,67	27,38	31,08	34,79	38,50	
$\beta = \arctg \frac{v}{\omega r}$ (°)	55,8	46,0	38,7	33,1	28,8	24,4	22,7	20,5	18,7	
α (°)	19,6	20,8	20,2	19,4	18,0	15,0	10,8	5,4	-0,6	
$\delta = (\beta - \alpha)$ (°)	36,2	25,2	18,5	13,7	10,8	10,4	11,9	15,1	19,3	
c_l	1,23	1,31	1,28	1,20	1,13	1,10	1,16	1,23	1,30	
c_w	0,60	0,42	0,30	0,23	0,18	0,17	0,20	0,24	0,31	
$\epsilon = \arctg \frac{c_w}{c_l}$ (°)	26,0	17,8	13,2	10,9	9,1	8,8	9,8	11,0	13,4	
$\beta - \epsilon$ (°)	29,8	28,2	25,5	22,3	19,8	16,6	12,9	9,5	5,3	
$\sin(\beta - \epsilon)$	0,50	0,47	0,43	0,38	0,34	0,29	0,22	0,16	0,10	
$\cos(\beta - \epsilon)$	0,87	0,88	0,90	0,93	0,94	0,96	0,97	0,99	1,0	
$w = \frac{v_{wind}}{\sin \beta}$ (m/s)	15,7	18,1	20,8	23,8	27,0	30,3	33,7	37,1	40,6	
w^2 (m ² /s ²)	247,23	327,6	432,6	566,4	729,0	918,0	1135,7	1376,4	1648,4	
$\sqrt{c_l^2 + c_w^2}$	1,37	1,38	1,31	1,22	1,14	1,11	1,18	1,25	1,34	
$h_p \times b \times \phi$ (kg s ² /m ³)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	
$T = h_p b w^2 \frac{\sqrt{c_l^2 + c_w^2}}{\sin(\beta - \epsilon)} \times g \times \phi$ (N/m ¹)	252	318	366	394	424	443	442	413	331	
$A = h_p b w^2 \frac{\sqrt{c_l^2 + c_w^2}}{\cos(\beta - \epsilon)} \times g \times \phi$ (N/m ¹)	441	594	765	964	1172	1467	1950	2555	3313	

Tabel 10 Dwarskrachten t.g.v. windbelasting vlucht: 22m v_{wind}: 13 m/s gang: 140 enden/min.

Omschrijving		doorsneden											
Afstand t.o.v. de as	(m)	0	1	1,9	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tangentiaal D _T	(N)	3367	3367	3367	3087	2772	2412	2015	1590	1152	720	322	0
Axiaal D _A	(N)	13296	13296	13296	12785	12180	11430	10485	9300	7795	5850	3305	0

Tabel 11 Momenten t.g.v. windbelasting vlucht: 22m v_{wind}: 13 m/s gang: 140 enden/min.

Omschrijving		doorsneden											
Afstand t.o.v. de as	(m)	0	1	1,9	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tangentiaal M _T	(Nm)	22487	19120	15753	12526	9597	7005	4792	2989	1618	682	161	0
Axiaal M _A	(Nm)	106370	93075	79780	66740	54255	42450	31490	21600	13052	6230	1653	0

Tabel 12. Spanningen in de doorsneden Vlucht: 22 m, v_{wind} : 13 m/s, gang: 140 enden/min, as-doorsnede: 330 . 280 mm

Omschrijving

	0	1	1,9	5	9
Afstand r t.o.v. de as (m)					
M t.g.v. de wind:					
Tangentiaaal T (Nm)	22487	19120	15753	7005	682
Axiaaal A (Nm)	106370	93075	79780	42450	6230
M t.g.v. permanente belasting:					
Tangentiaaal T (Nm)	37647	29885	22996	8733	776
Axiaaal A (Nm)	9387	7451	5734	2177	194
w_x x 10^3 (mm ³)	1182	1017	910	414	159
w_y x 10^3 (mm ³)	1289	1108	980	415	139
Spanningen Tangentiaaal (N/mm ²)	50,9	48,2	42,6	38,0	9,2
Axiaaal (N/mm ²)	89,8	90,7	87,3	107,5	46,2
Centrifugaal (N/mm ²)	3,9	3,5	3,2	2,1	0,7
Vangspanning (N/mm ²)	15,8	14,3	13,1	8,6	2,9
Totaal + vangen (N/mm ²)	160,4	156,7	146,2	156,2	59,0

Tabel 13

Bepaling Lift- en weerstandskrachten : vlucht: 22 m, v_{wind} : 13 m/s, gang : 0 enden/min.

Omschrijving	Doorsneden															
Afstand r doorsnede tot de as (m)	2,41	3,42	4,43	5,44	6,45	7,46	8,47	9,48	10,49							
ω	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
b	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25							
v_{wind}	13	13	13	13	13	13	13	13	13							
$u_r = \omega r$	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
$\beta = \arctg \frac{v}{\omega r}$	90	90	90	90	90	90	90	90	90							
α	19,6	20,8	20,2	19,4	18,0	15,0	10,8	5,4	-0,6							
$\delta = (\beta - \alpha)$	70,4	69,2	69,8	70,6	72,0	75,0	79,2	84,6	96							
c_l	0,66	0,70	0,68	0,66	0,62	0,55	0,47	0,32	0							
c_w	1,08	1,07	1,08	1,08	1,10	1,10	1,13	1,19	1,20							
$\epsilon = \arctg \frac{c_w}{c_l}$	58,6	56,8	57,8	58,6	60,6	63,4	67,4	75,0	90,0							
$\beta - \epsilon$	31,4	33,2	32,2	31,4	29,4	26,6	22,6	15,1	0							
$\sin(\beta - \epsilon)$	0,52	0,55	0,53	0,52	0,49	0,45	0,38	0,26	0							
$\cos(\beta - \epsilon)$	0,85	0,84	0,85	0,85	0,87	0,89	0,92	0,97	1							
$w = \frac{v_{wind}}{\sin \beta}$	13	13	13	13	13	13	13	13	13							
w^2	169	169	169	169	169	169	169	169	169							
$\sqrt{c_l^2 + c_w^2}$	1,27	1,28	1,28	1,27	1,26	1,23	1,22	1,23	1,20							
$\frac{1}{2} \rho \times b \times \phi$	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15							
$T = \frac{1}{2} \rho b w^2 \sqrt{c_l^2 + c_w^2} \times \sin(\beta - \epsilon) \times g \times \phi$	167	177	172	167	157	139	118	81	0							
$A = \frac{1}{2} \rho b w^2 \sqrt{c_l^2 + c_w^2} \times \cos(\beta - \epsilon) \times g \times \phi$	274	271	271	274	274	279	284	302	304							

Tabel 14 Bepaling α , (doorbuiging heklatten) vlucht 22m, $v_{wind} = 13$ m/s, gang 100 enden/min

Omschrijving

Doorsneden

Afstand r tot doorsnede	(m)	2,41	3,42	4,43	5,44	6,45	7,46	8,47	9,48	10,49
L	(mm)	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
α (tabel 1)	(\circ)	19,6	20,8	20,2	19,4	18,0	15,0	10,8	5,4	-0,6
A (tabel 2)	(N)	340	435	568	672	837	1014	1229	1639	2014
$\frac{f_{bijk}}{2} = \frac{A}{70,1}$	(mm)	4,85	6,21	8,10	9,58	11,94	14,47	17,53	23,31	28,73
Sin α	(\circ)	0,34	0,36	0,35	0,33	0,31	0,26	0,19	0,09	-0,01
$f = L \sin \alpha$	(mm)	536,7	568,2	552,5	531,5	494,4	414,1	299,8	150,6	-16,8
$\alpha' = \arcsin \left(\frac{f + f_{bijk}}{L} \right)$	(\circ)	19,78	21,04	20,51	19,77	18,45	15,54	11,44	6,24	0,43

Omschrijving

Doorsneden

Afstand doorsnede tot de as	(m)	2,41	3,42	4,43	5,44	6,45	7,46	8,41	9,48	10,49
w	(m)	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62
b	(m/s)	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25
v_{wind}	(m/s)	13	13	13	13	13	13	13	13	13
$u_r = \omega r$	(m/s)	6,31	8,96	11,61	14,25	19,60	19,55	22,19	24,19	27,48
$\beta = \arctg \frac{v}{\omega r}$	(°)	65,1	56,0	48,0	43,0	37,5	34,0	31,0	27,0	24,5
α_1	(°)	19,78	21,04	20,51	19,77	18,45	15,54	11,44	6,24	0,43
$\delta = (\beta - \alpha)$	(°)	45,22	34,96	27,49	23,23	19,05	18,46	19,56	20,76	24,07
c_l		1,09	1,23	1,29	1,30	1,28	1,27	1,28	1,29	1,30
c_w		0,74	0,57	0,45	0,37	0,31	0,30	0,31	0,33	0,40
$\epsilon = \arctg \frac{c_w}{c_l}$	(°)	34,17	24,86	19,23	15,89	13,61	13,29	13,61	14,35	17,10
$\beta - \epsilon$	(°)	30,83	31,14	28,77	27,11	23,89	20,71	17,39	12,65	7,40
$\sin(\beta - \epsilon)$		0,51	0,52	0,48	0,46	0,40	0,35	0,30	0,22	0,13
$\cos(\beta - \epsilon)$		0,86	0,86	0,88	0,89	0,91	0,94	0,95	0,98	0,99
$w = \frac{v_{wind}}{\sin \beta}$	(m/s)	14,31	15,68	17,49	19,06	21,35	23,25	25,24	28,63	31,35
w^2	(m ² /s ²)	205,64	245,89	306,01	363,35	456,03	540,46	637,10	819,96	982,73
$\sqrt{c_l^2 + c_w^2}$		1,32	1,36	1,37	1,35	1,32	1,30	1,32	1,33	1,36
$\rho \times b \times \phi$	(kg s ² /m ³)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
$T = \rho b w^2 \frac{\sqrt{c_l^2 + c_w^2}}{\sin(\beta - \epsilon)} \times g$	(N/m ¹)	208	261	302	338	361	369	378	360	261
$A = \rho b w^2 \frac{\sqrt{c_l^2 + c_w^2}}{\cos(\beta - \epsilon)} \times g$	(N/m ¹)	350	431	553	655	822	991	1198	1603	1985

Tabel 16

Bepaling gereduceerde momenten t.g.v. permanente belasting in de windrichting
vlucht 22 m, v_{wind} 13 m/s, gang 100 enden/min.

Omschrijving

Links (L) of rechts (R) van de doorsneden

	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L
Afstand t.o.v. de as	0	1	1	3	5	5	7	9	9	10
$I_y \cdot 10^4 \text{ mm}^4$	21271	21271	18282	12282	7748	5027	2945	1522	1072	724
$E \text{ (N/mm}^2\text{)}$	210×10^3	210×10^3	210×10^3	210×10^3	210×10^3	210×10^3	210×10^3	210×10^3	210×10^3	210×10^3
$EI \times 10^{12} \text{ Nmm}^2$	44,7	44,7	38,4	25,8	16,3	11,0	5,9	3,2	2,25	1,52
$M \text{ (e.g.)} \times 10^3 \text{ Nmm}$	38800	30800	30800	17700	9000	9000	3700	800	800	210
$\frac{M}{EI} \times 10^{-11} \frac{1}{\text{mm}}$	8,69	6,89	8,02	6,86	5,52	8,18	6,27	2,50	3,56	1,38

Tabel 17

Bepaling van de hoekverdraaiing t.g.v. permanente belasting in de windrichting
vlucht 22 m, v_{wind} 13 m/s, gang 100 enden/min.

Omschrijving

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Afstand t.o.v. de as (m)	0	0,6	2,9	7,2	13,4	20,2	28,1	33,9	40,4	47,5	55,2	63,0
Hoekverdraaiing $\times 10^4$	0	0,03	0,21	0,72	1,75	3,45	5,87	9,0	12,7	17,9	23,0	28,3
Verplaatsing (mm)												

Grafieken behorende bij de berekeningsvoorbeelden

Inhoud:

Grafiek 1	zeeg voor 22 m roede		
"	2 krachten tangentiaal	t.g.v. de windbelasting	100 enden/min
"	3 krachten axiaal	t.g.v. de windbelasting	100 enden/min
"	4 dwarskrachten tangentiaal	t.g.v. de windbelasting	100 enden/min
"	5 dwarskrachten axiaal	t.g.v. de windbelasting	100 enden/min
"	6 momenten tangentiaal	t.g.v. de windbelasting	100 enden/min
"	7 momenten axiaal	t.g.v. de windbelasting	100 enden/min
"	8 permanente belasting		
"	9 dwarskrachten t.g.v. de permanente belasting		
"	10 momenten t.g.v. de permanente belasting		
"	11 weerstandsmomenten		
"	12 krachten tangentiaal	t.g.v. de windbelasting	140 enden/min
"	13 krachten axiaal	t.g.v. de windbelasting	140 enden/min
"	14 dwarskrachten tangentiaal	t.g.v. de windbelasting	140 enden/min
"	15 dwarskrachten axiaal	t.g.v. de windbelasting	140 enden/min
"	16 momenten tangentiaal	t.g.v. de windbelasting	140 enden/min
"	17 momenten axiaal	t.g.v. de windbelasting	140 enden/min
"	18 belasting gereduceerde momentenlijn		
"	19 hoekverdraaiing		
"	20 doorbuiging		

hoogte	afstand t.o.v as [m]	zeeg in [°]
1	10,90	+3
3	10,18	-2
6	9,10	-8
9	8,02	-13
12	6,94	-17
15	5,86	-19
18	4,78	-20
21	3,70	-21
24	2,62	-20
26	1,90	-19,50

AS

3
0
2
8
13
17
19
21
20

afstand [m]

ZEEG
Vlucht 22 m

grafiek 1

KRACHTEN TANGENTIAAL
T.G.V. DE
WINDBELASTING
22m ROEDE

belasting $[N/m]$

1000

800

500

400

200

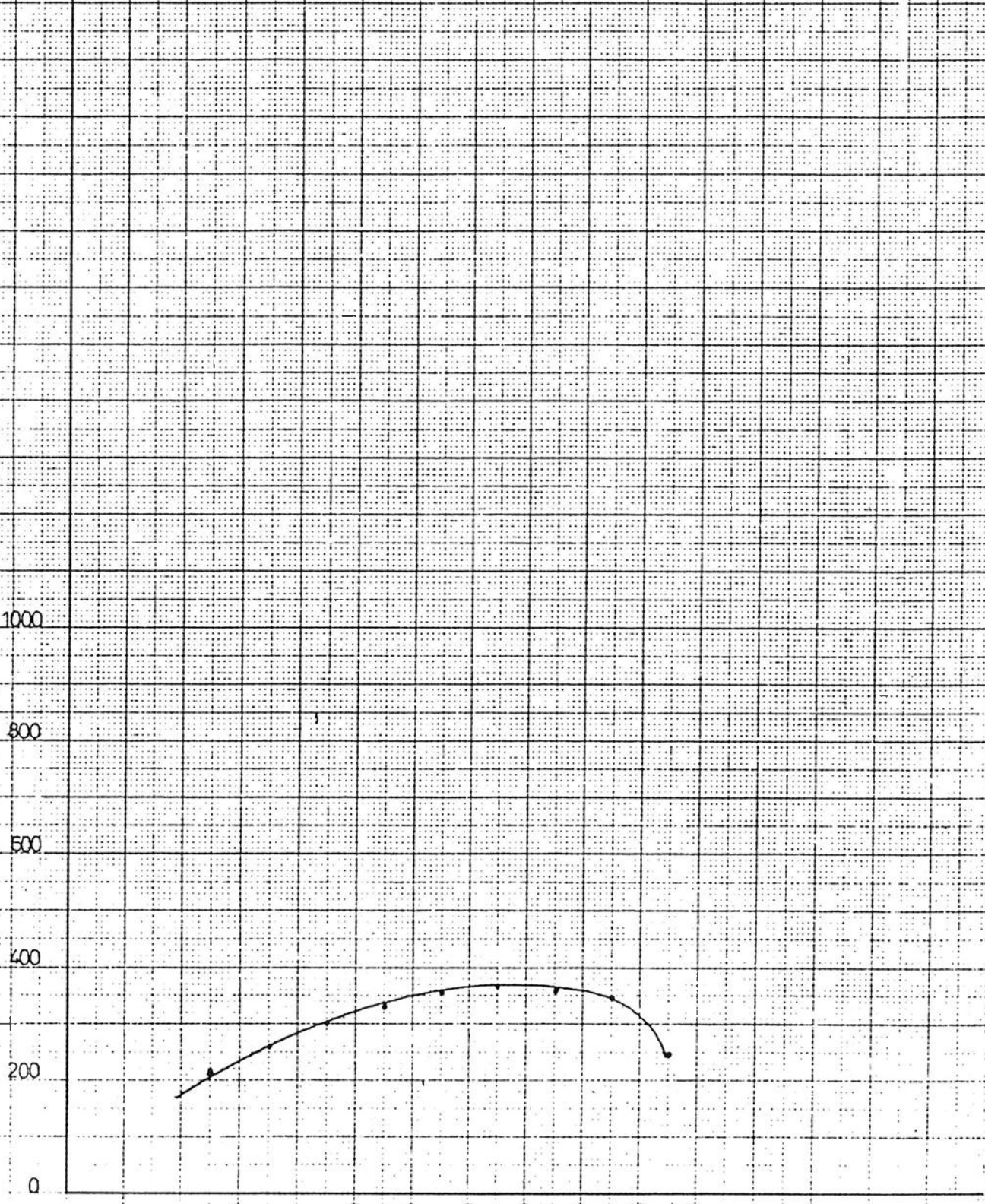
0

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

As

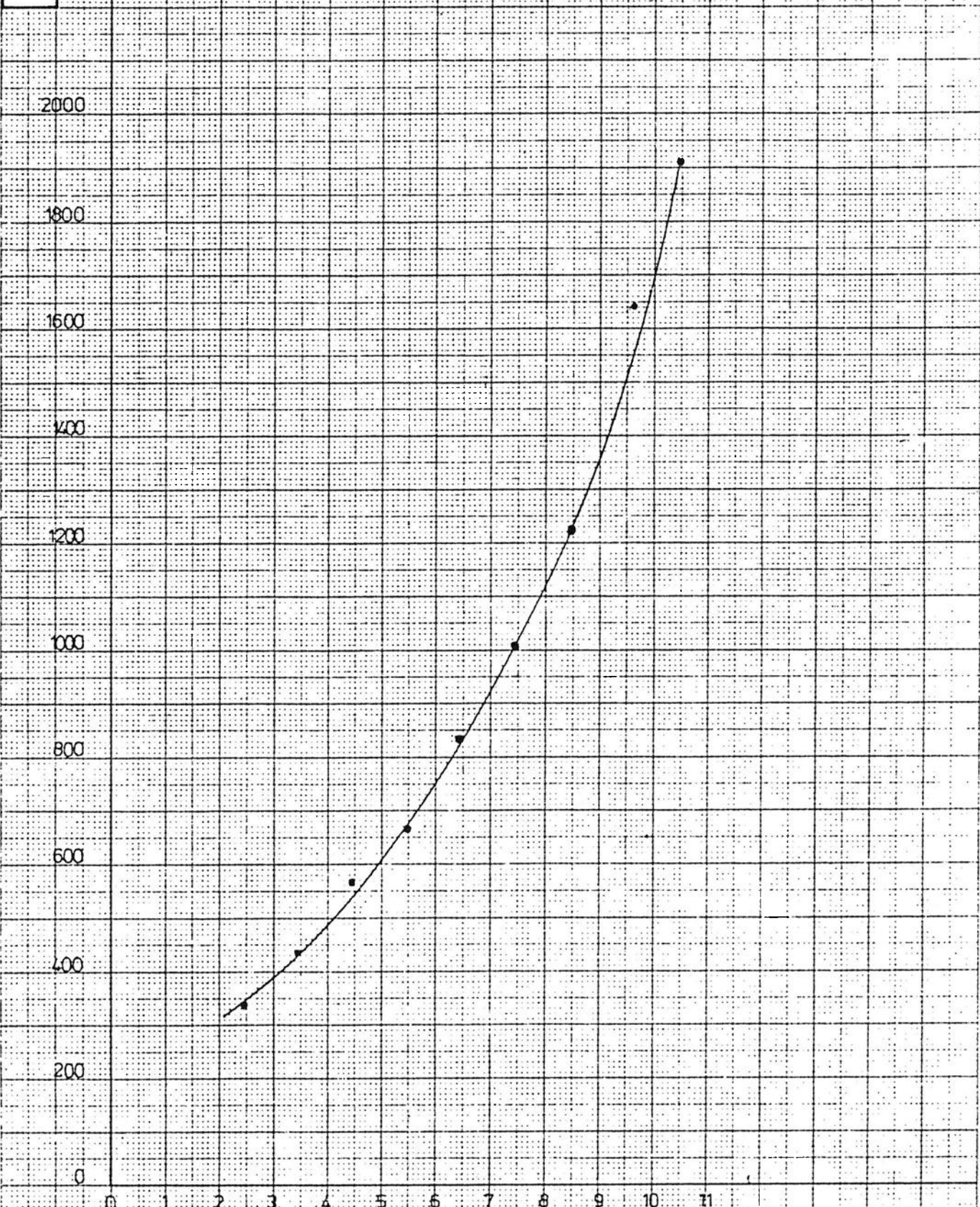
grafiek 2

afstand $[m]$



KRACHTEN AXIAAL
T.G.V. DE
WINDBELASTING
22 m ROEDE

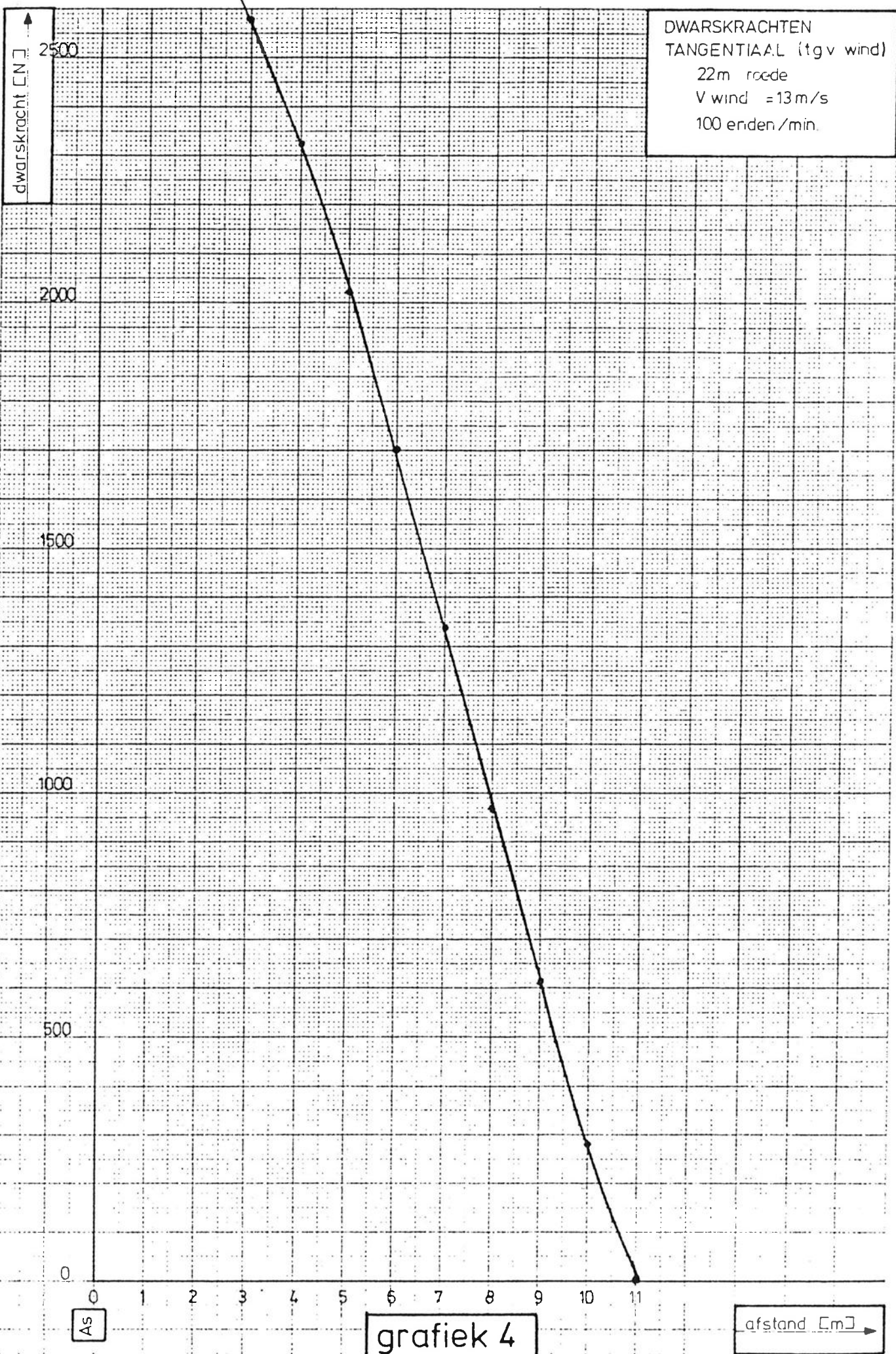
belasting [N/m]



As

grafiek 3

afstand [m]

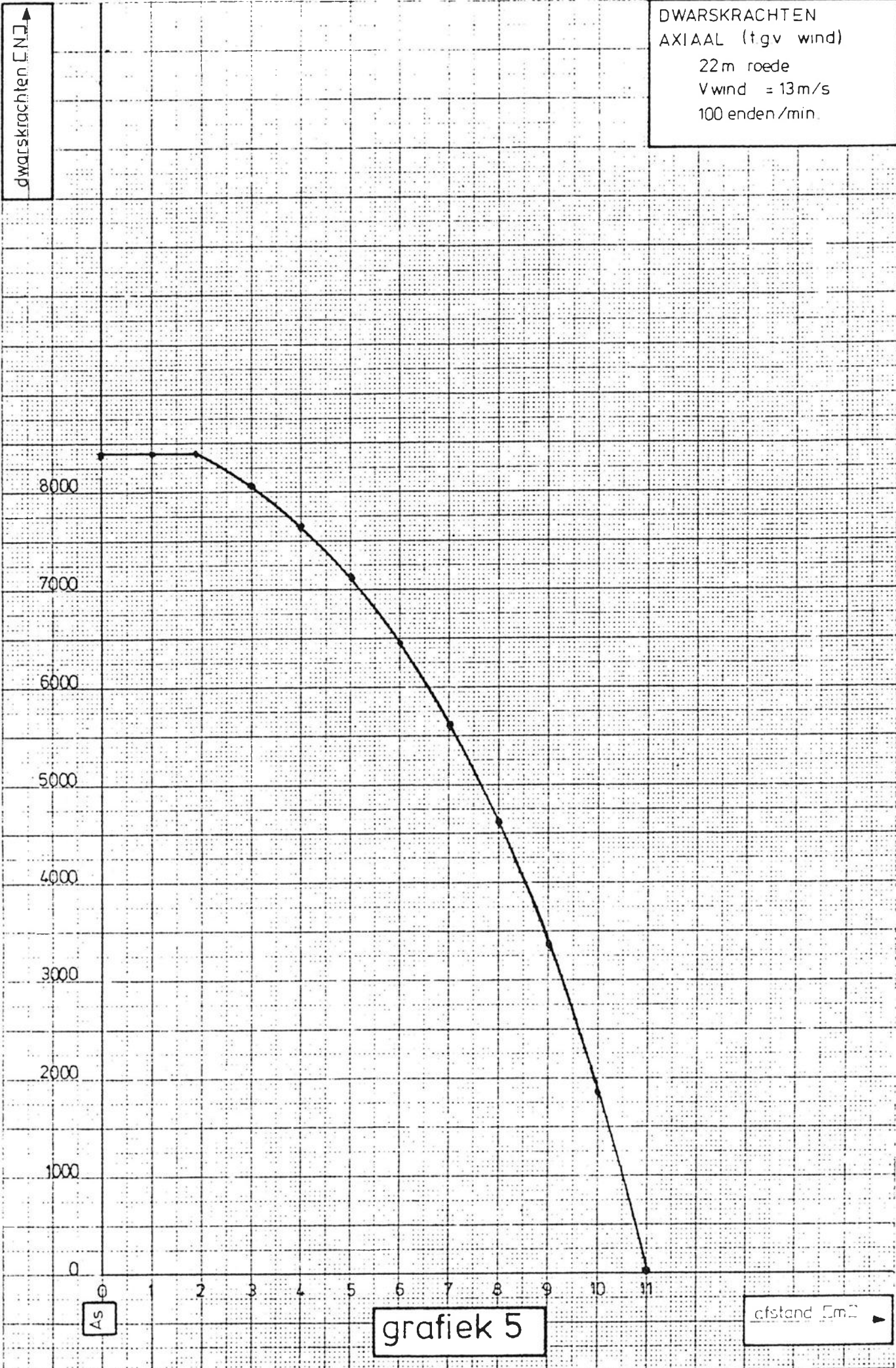


As

grafiek 4

afstand [cm]

DWARSKRACHTEN
AXIAAL (tgv wind)
22m roede
Vwind = 13m/s
100 enden/min.

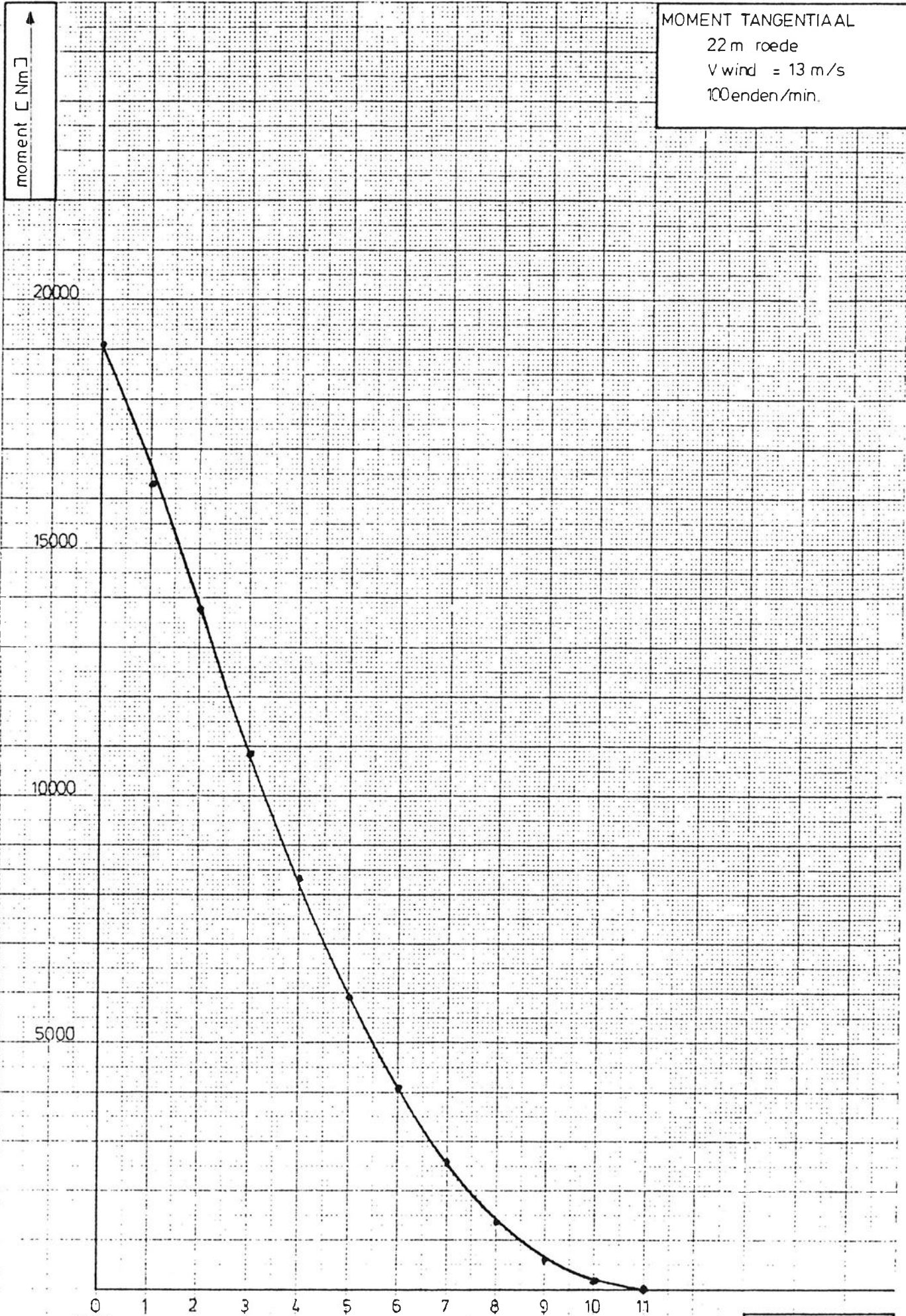


As

grafiek 5

afstand [m]

MOMENT TANGENTIAAL
22 m roede
V wind = 13 m/s
100 enden/min.

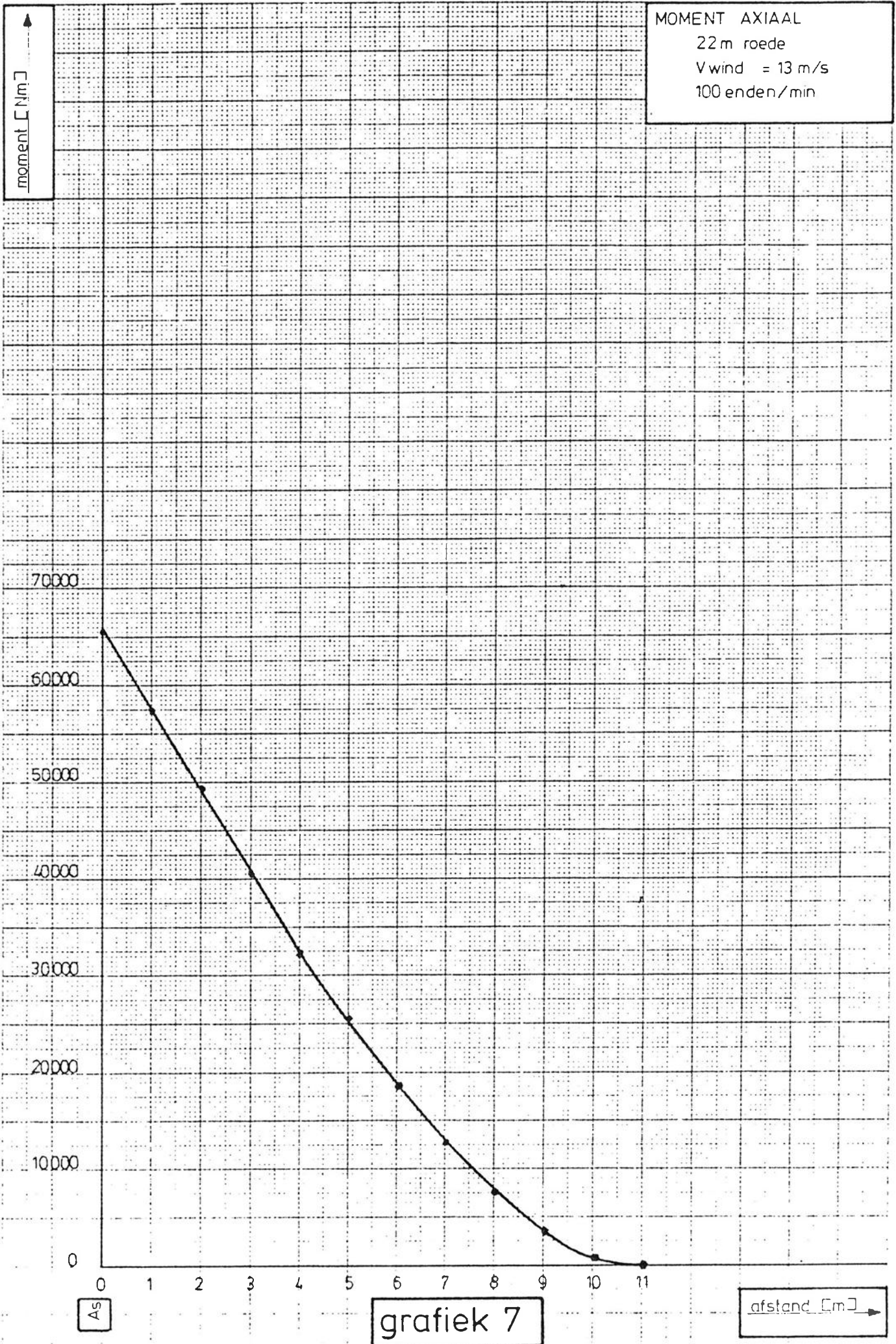


As

grafiek 6

afstand [m]

MOMENT AXIAAL
22 m roede
Vwind = 13 m/s
100 enden/min



As

grafiek 7

afstand [m]

PERMANENTE BELASTING
22 m roede

belasting [N/m] ↑

1500

1000

500

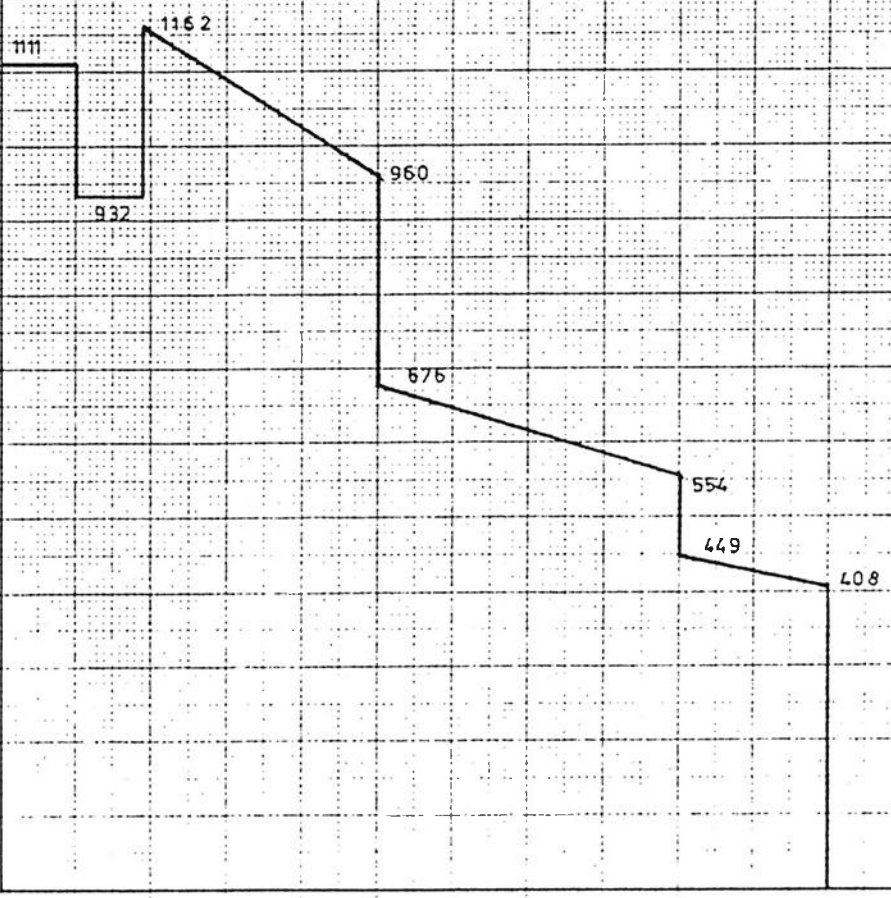
0

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

As 0

grafiek 8

afstand [m] →



DWARSKRACHT t.g.v. de
PERMANENTE BELASTING
22 m roede

dwarskracht [N]

15000

10000

5000

0

0

1

2

3

4

5

6

7

8

9

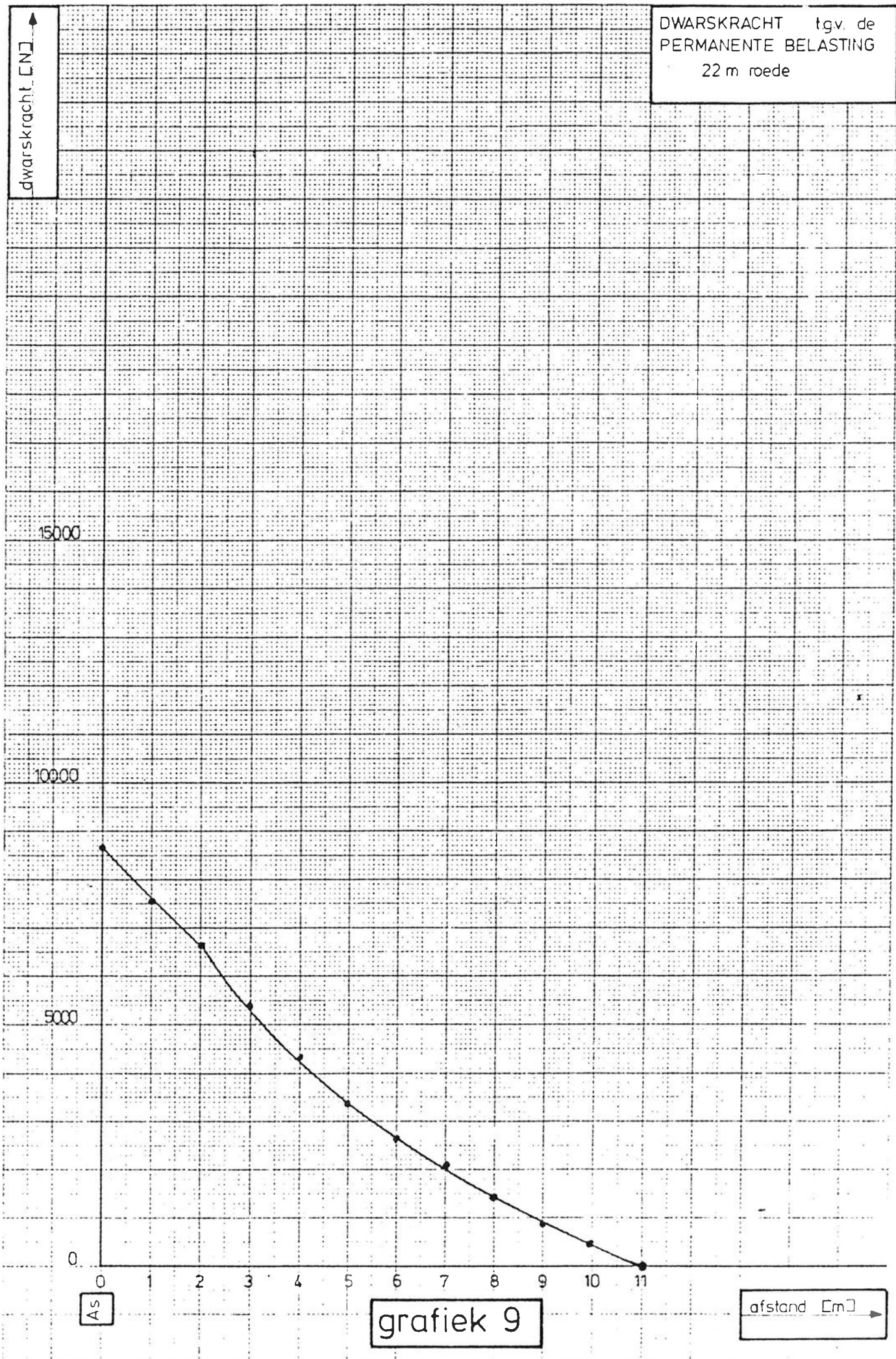
10

11

As

grafiek 9

afstand [m]



MOMENTEN t.g.v. de
PERMANENTE BELASTING
22 m roede

momenten [Nm]

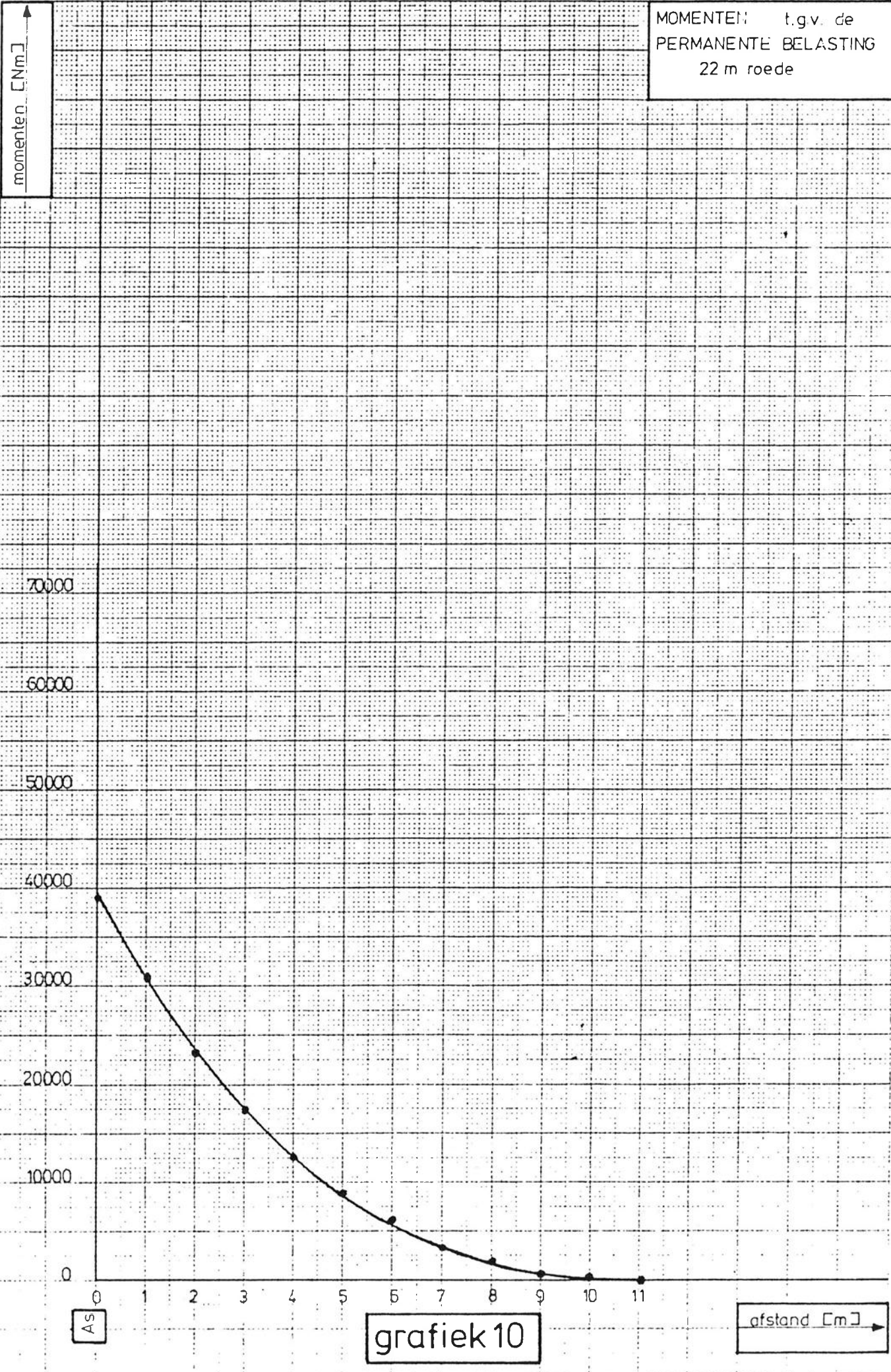
70000
60000
50000
40000
30000
20000
10000
0

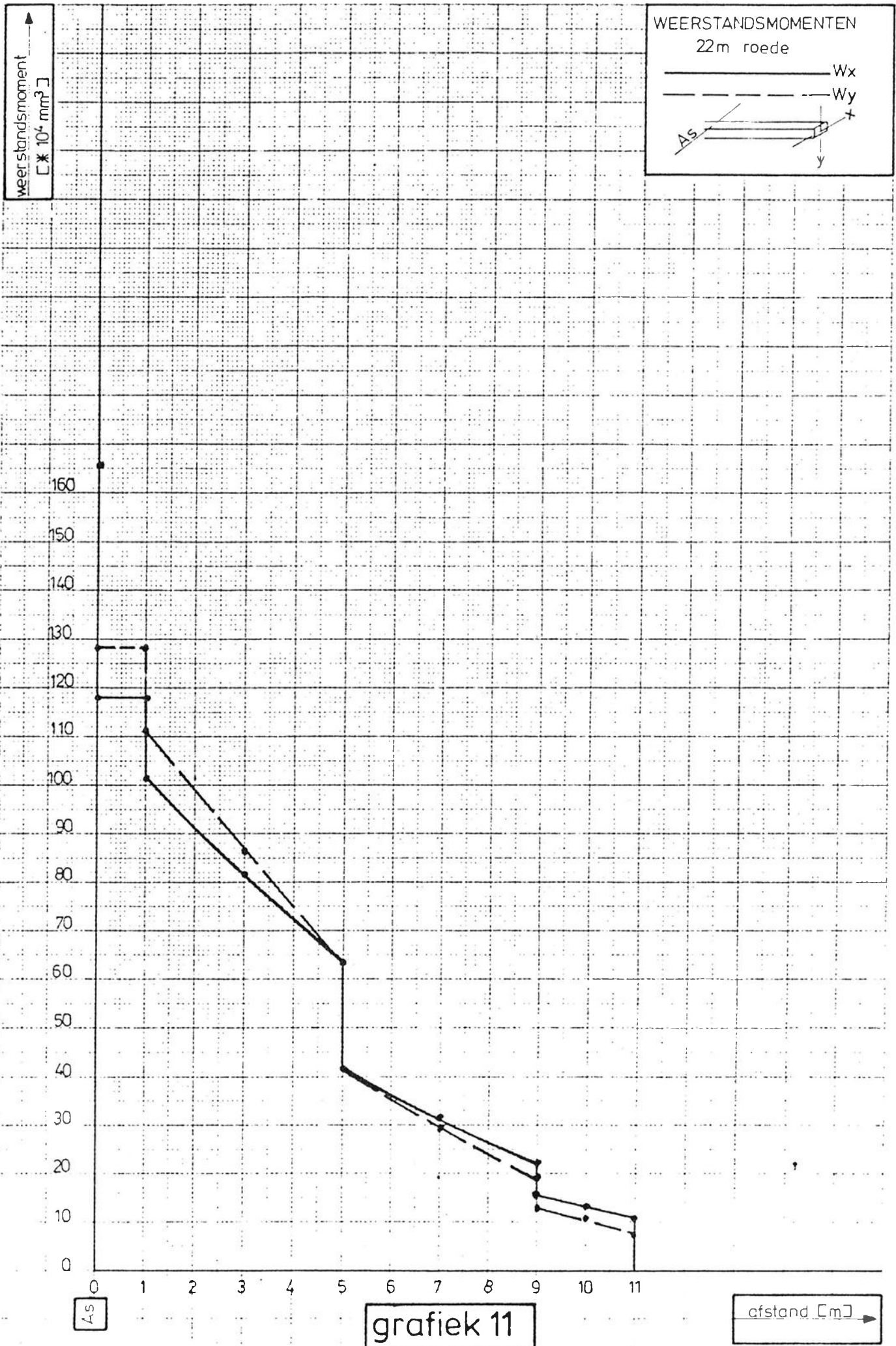
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

AS

grafiek 10

afstand [m]



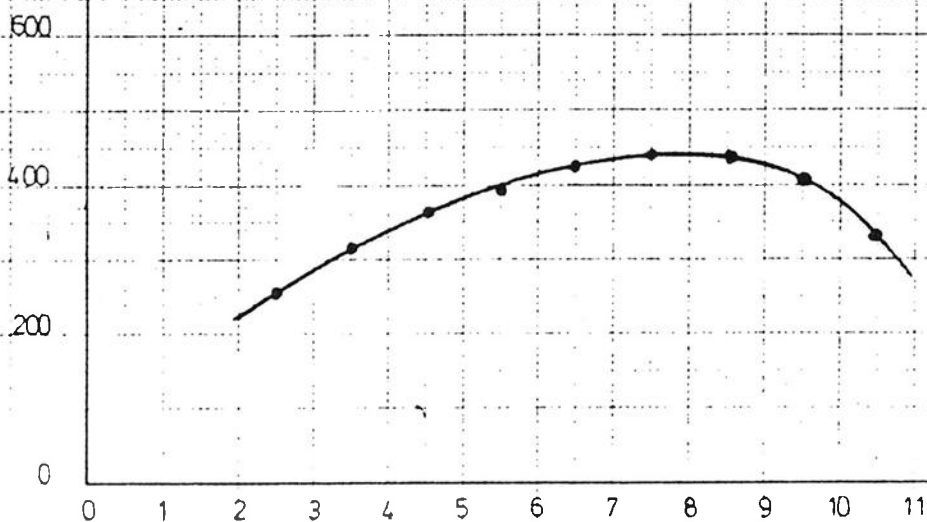


grafiek 11

KRACHTEN TANGENTIAAL
T.G.V. DE WINDBELASTING

22 m roede
 $v_{wind} = 13 \text{ m/s}$
140 enden/min

belasting [N/m]

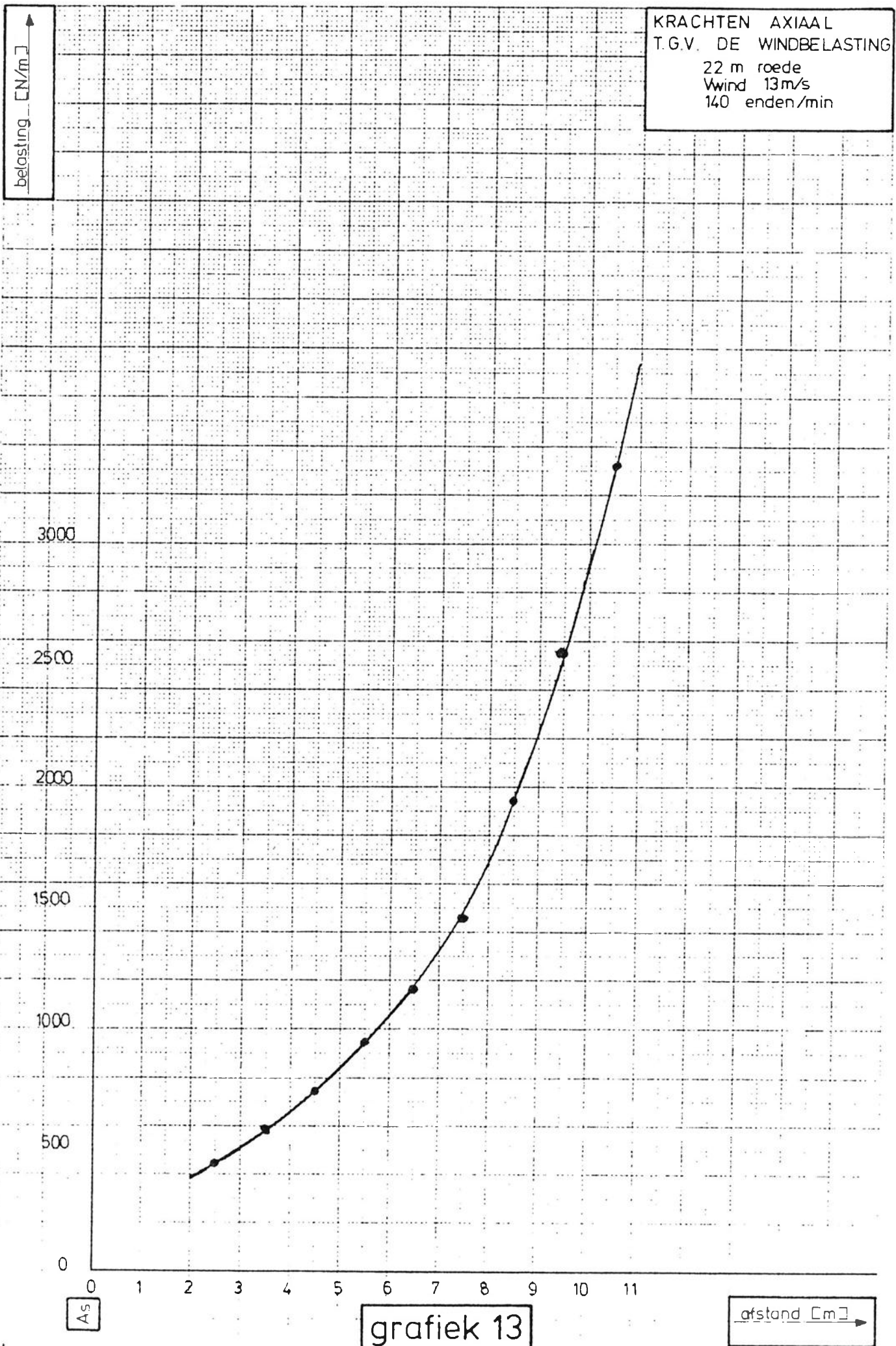


As

grafiek 12

afstand [m]

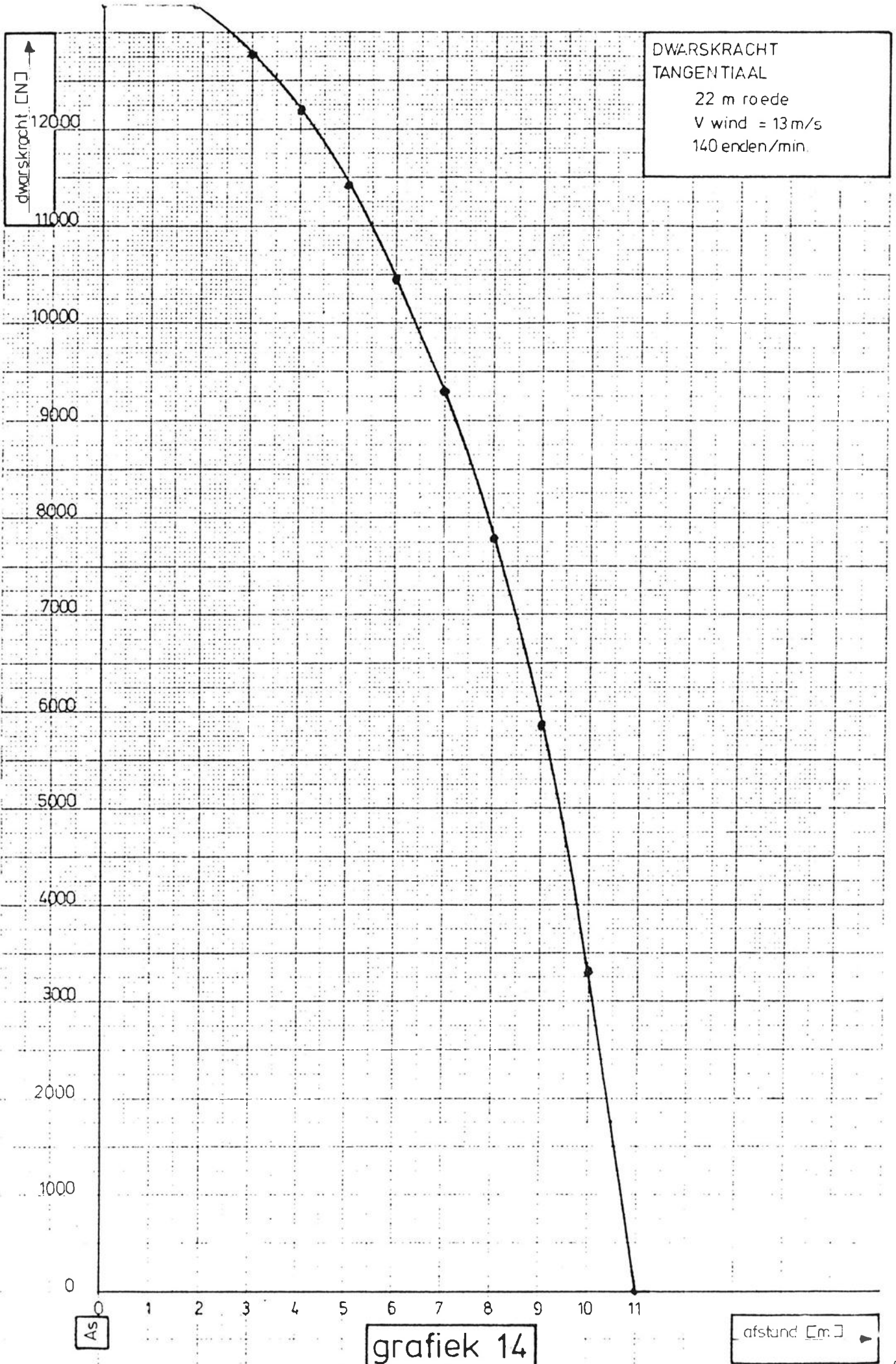
KRACHTEN AXIAAL
T.G.V. DE WINDBELASTING
22 m roede
Wind 13m/s
140 enden/min



As

grafiek 13

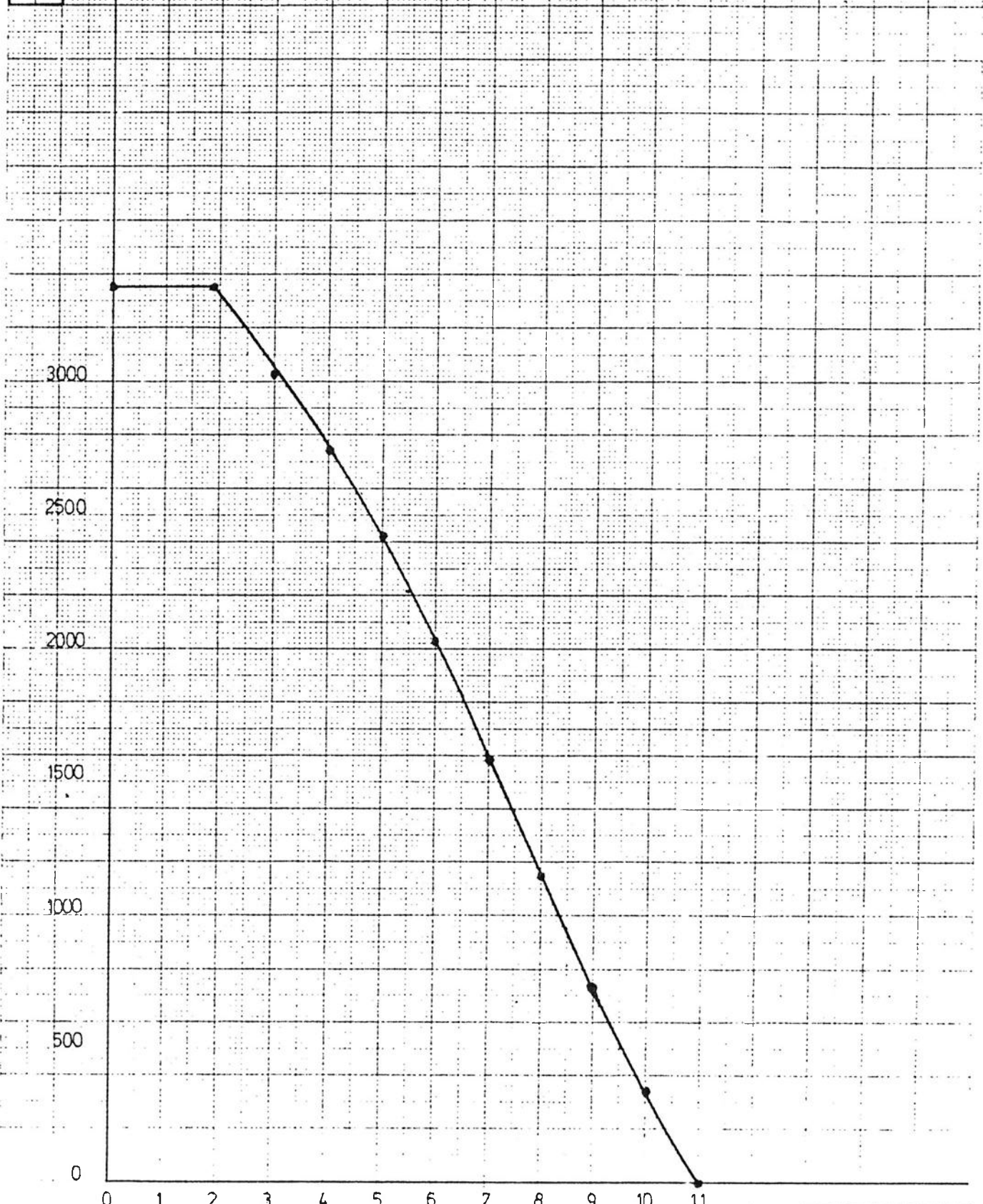
afstand [m]



grafiek 14

DWARSKRACHT
AXIAAL
22 m roede
V wind = 13 m/s
140 enden/min.

dwarsskracht [N]



As

grafiek 15

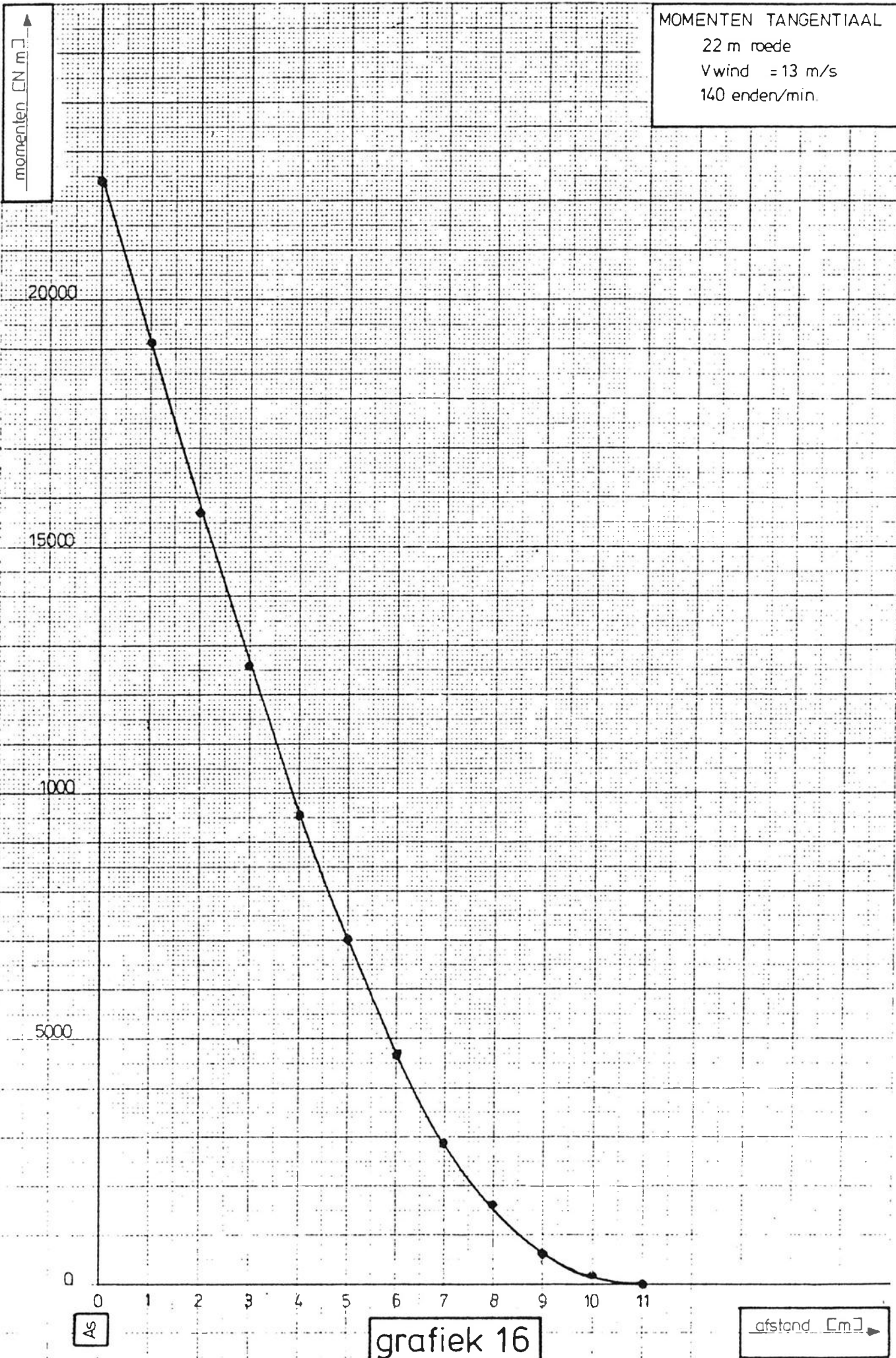
afstand [m]

MOMENTEN TANGENTIAAL

22 m roede

Vwind = 13 m/s

140 enden/min.

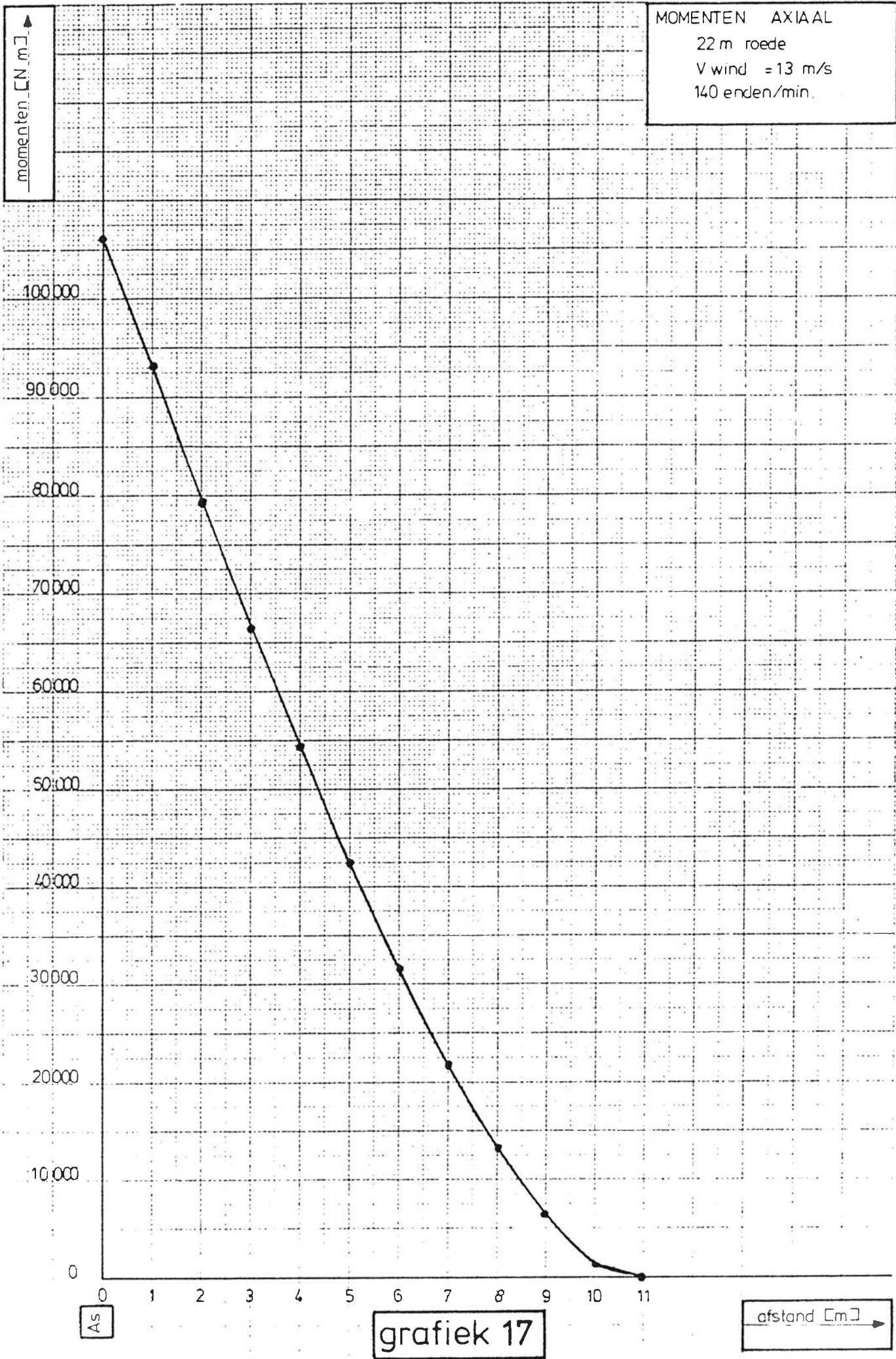


As

grafiek 16

afstand [m]

MOMENTEN AXIAAL
22 m roede
V wind = 13 m/s
140 enden/min.

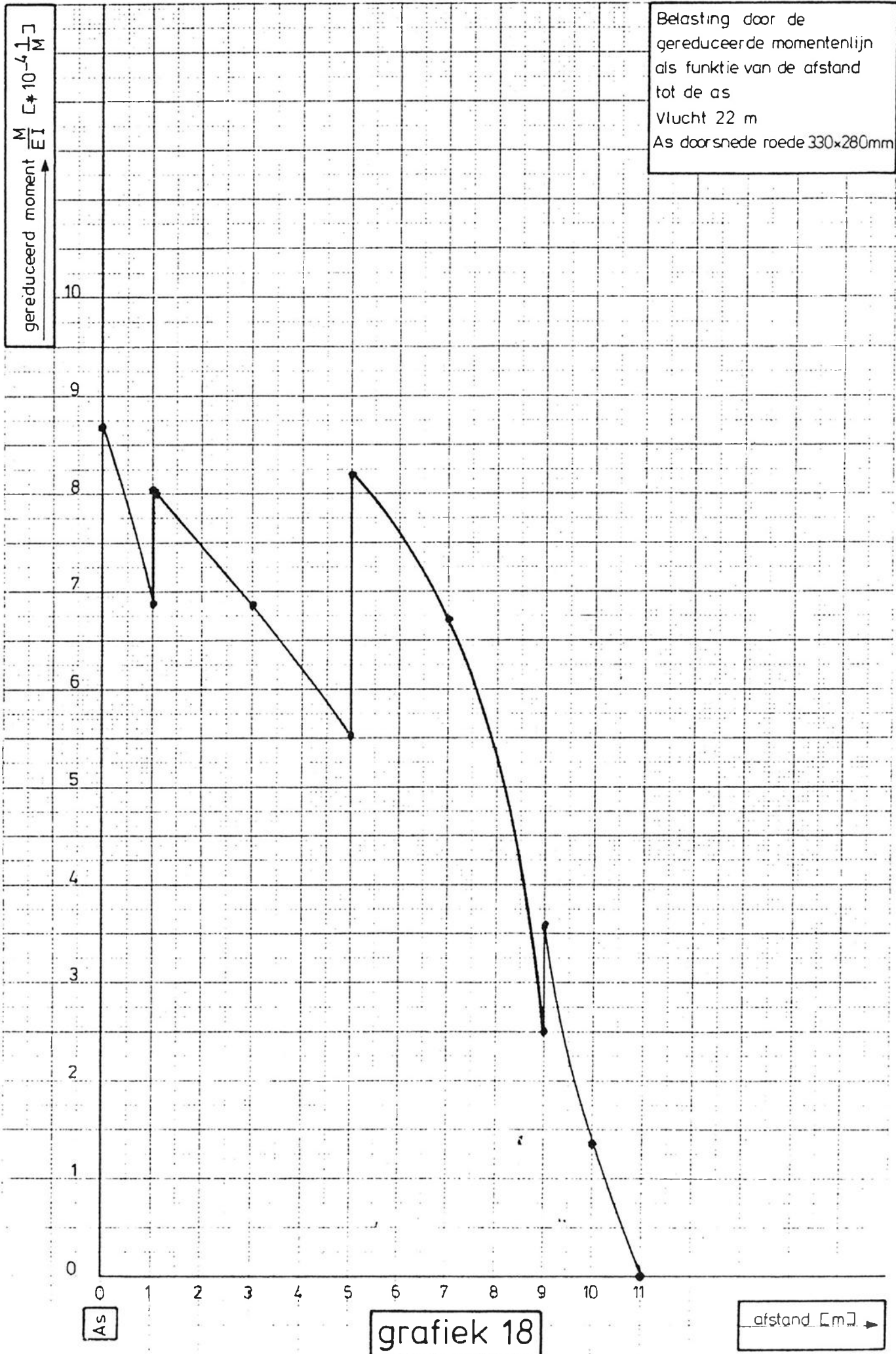


As

grafiek 17

afstand [cm]

Belasting door de
 gereduceerde momentenlijn
 als functie van de afstand
 tot de as
 Vlucht 22 m
 As doorsnede roede 330x280mm

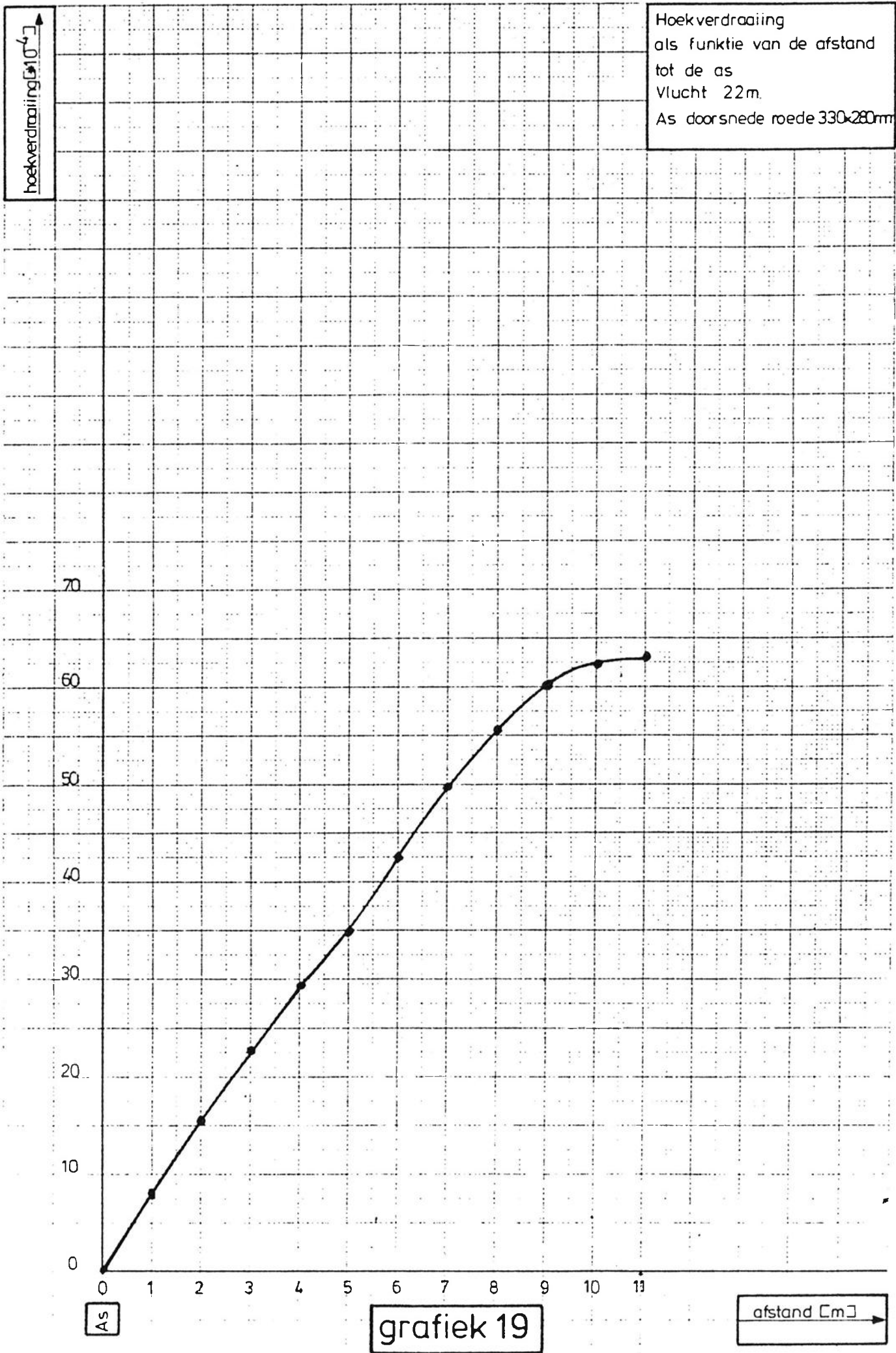


As

grafiek 18

afstand [m]

Hoekverdraaiing
als functie van de afstand
tot de as
Vlucht 22m.
As doorsnede roede 330x280mm



As

grafiek 19

afstand [cm]

doorbuiging [mm]

DOORBUIGING
ALS FUNKTIE VAN DE
AFSTAND TOT DE AS
vlucht 22 m
as-doorsnede roede 330×280
mm

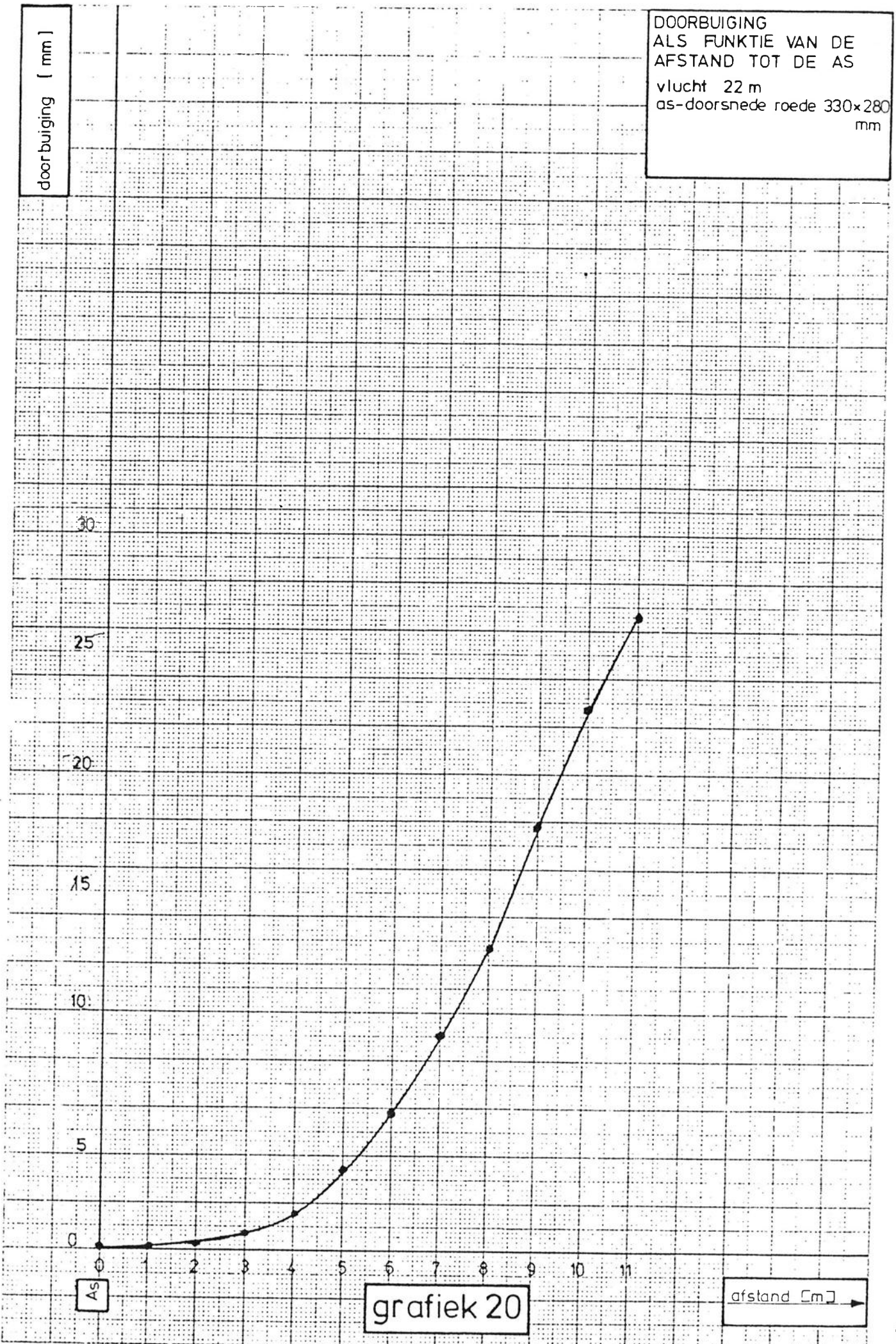
30
25
20
15
10
5
0

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

As

grafiek 20

afstand [m] →



Bijlagen

Bijlage I : liftcoëfficiënt

Bijlage II : weerstandscöëfficiënt

Bijlage III : liftcoëfficiënt

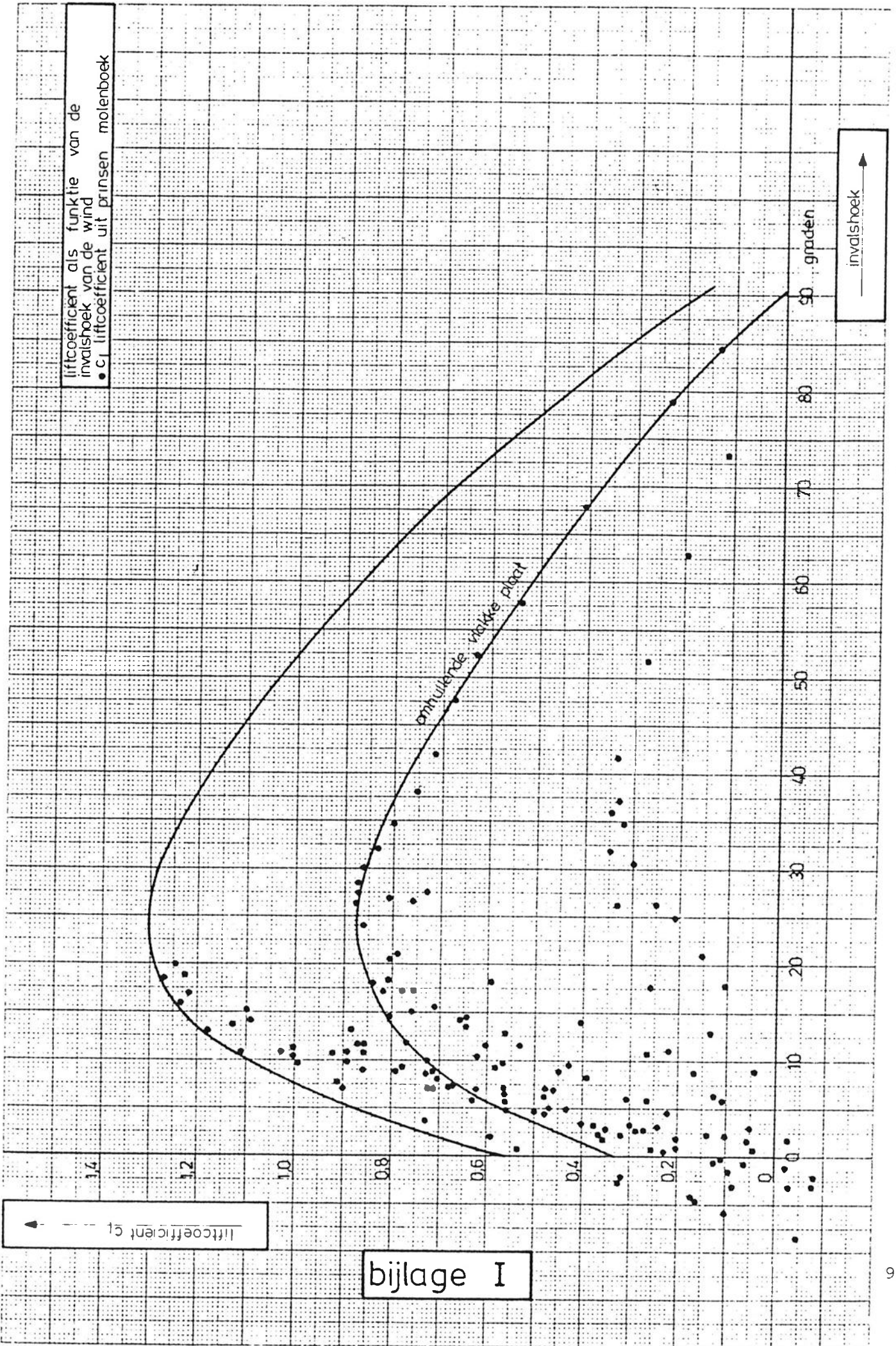
Bijlage IV : weerstandscöëfficiënt

Bijlage V : konstruktie schema "potroeden"

Bijlage VI : potroede 22 m lijn c + lijn a

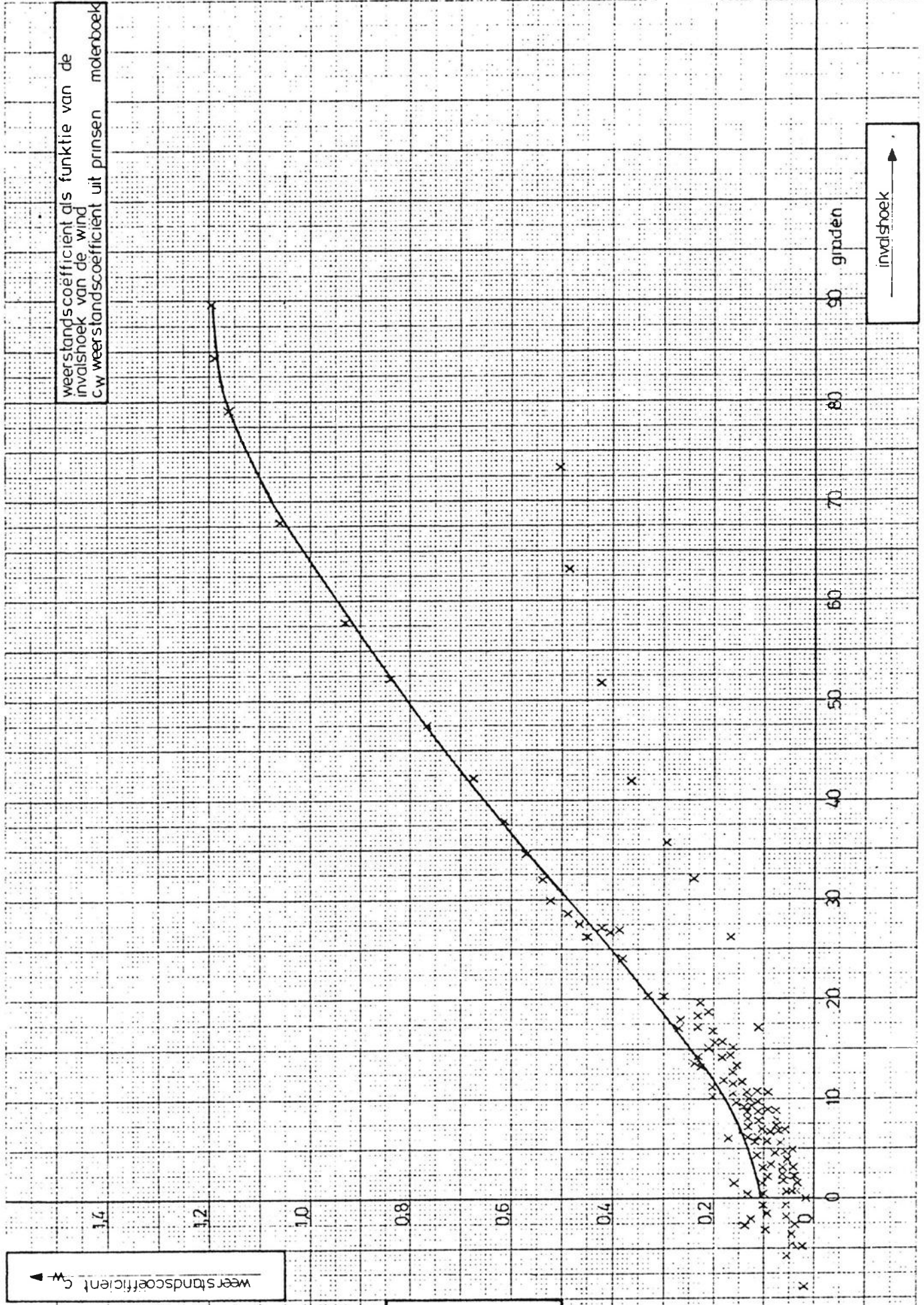
Bijlage VII : definitieve roede 22 m lijn c

Bijlage VIII: potroede 29 m lijn a

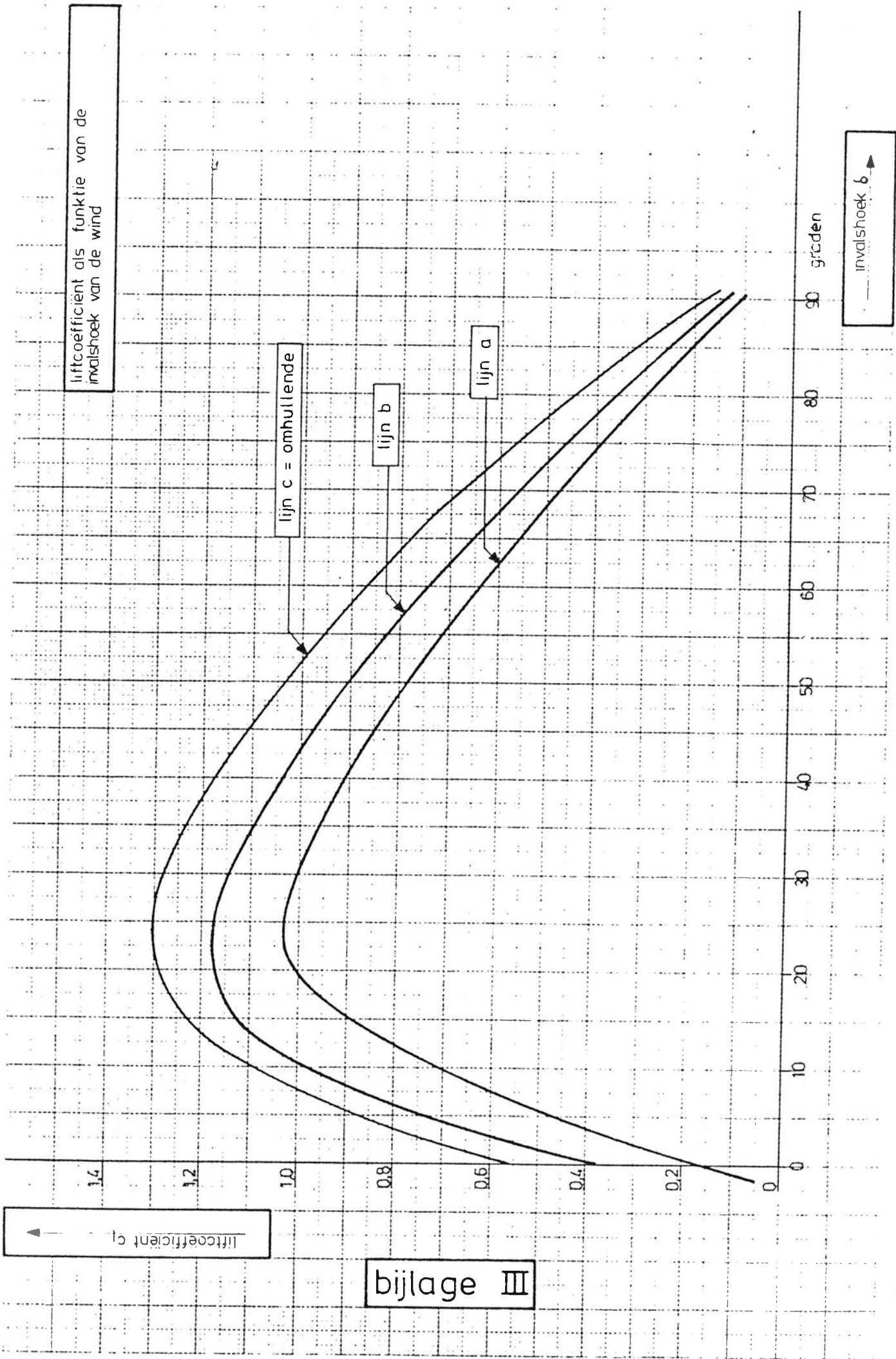


bijlage I

weerstandscoefficient als functie van de
invalshoek van de wind
 C_w weerstandscoefficient uit prinsen molenboek

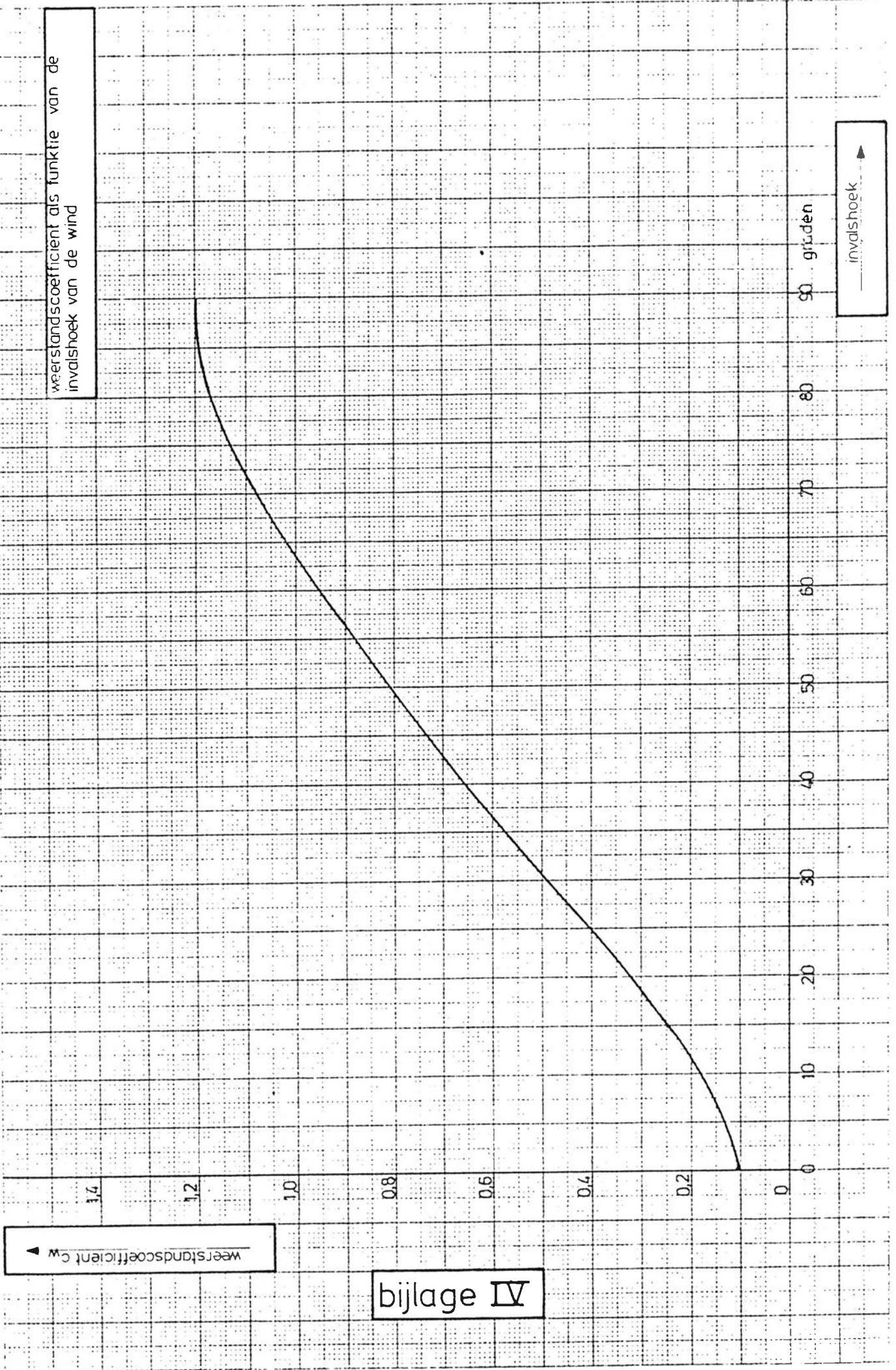


bijlage II



bijlage III

weerstandscoefficient als functie van de invalshoek van de wind

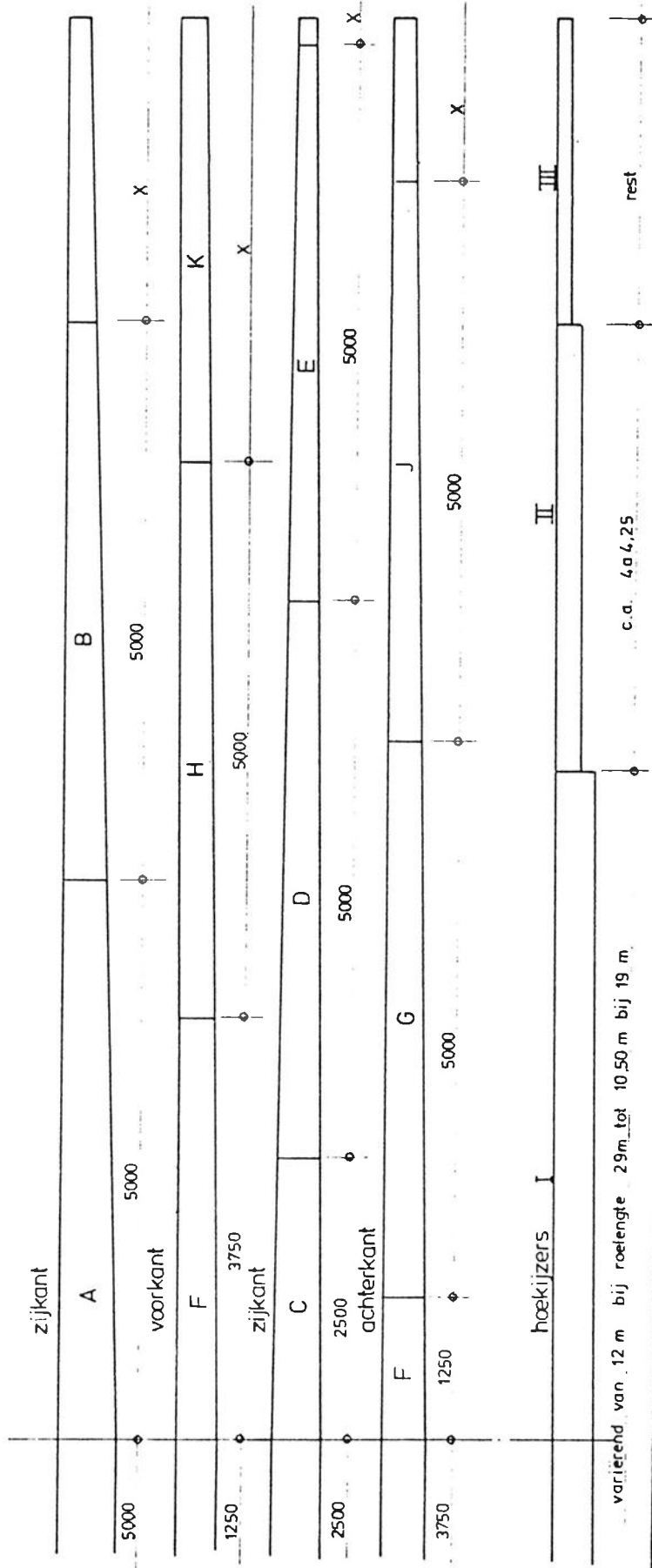


weerstandscoefficient c_w

bijlage IV

invalshoek

Konstruktieschema Potroeden



bijlage V

roellengte	Hoekijzers											Plaatdikten										
	I			II			III			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	rest	
27 - 29m	2 1/2" x 2 1/2" x 11mm			2 1/2" x 6 d 7mm			1 1/2" x 1 1/2" x 4 of 6mm			7	7/32	8	1/4"	5	8	7	1/4"	5 1/2	4	1/8"		
27 - 25.50	2 1/2" x 2 1/2" x 10mm			2 1/2" x 1 1/4"			1 1/2" x 1 1/2" x 4 mm			1 1/4"	7/32	5 1/8	1/4"	5	8	1 1/4"	6	5	4	1/8"		
25.50 - 23	2 1/4" x 2 1/4" x 9mm			2 1/2" x 1 1/4"			1 1/2" x 1 1/2" x 4mm			5	4	7	5	1/8"	7	1 1/4"	5	4	1/8"	1/8"		
23 - 19	2 1/2" x 7/2mm			2 1/2" x 1 1/4"			1 1/2" x 1 1/2" x 4mm			6	4	7	5	1/8"	7	1 1/4"	5	4	1/8"			
19 en korter	2 1/2" x 1 1/4"			1 1/2" x 1 1/2" x 4mm			-			5	4	1 1/4"	4	1/8" 1/4"	5	4	1/8"					

Behoudens kleine afwijkingen

De roeden voor zelfzichters worden dikwijls voorzien van hoofdhoekijzers die 1mm dikker zijn

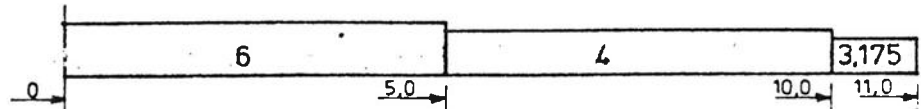
Potroede vlucht 22 mm

overzicht plaatschema en spanningen. middenzwaarte 330x280

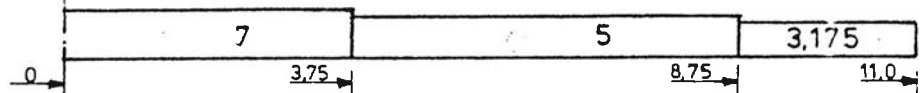
konstruktieschema

plaatdikten (mm) en afstanden tot de as (m)

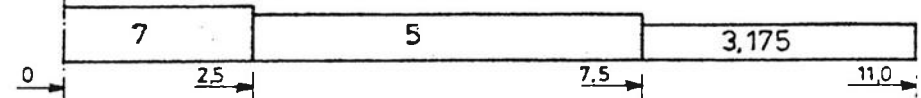
zijplaat



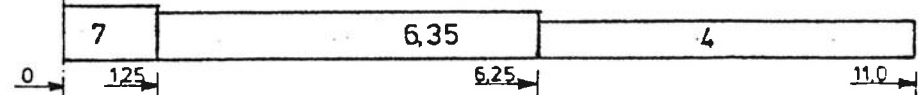
voorplaat



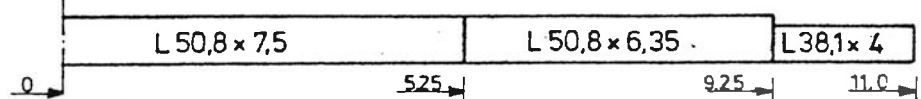
zijplaat



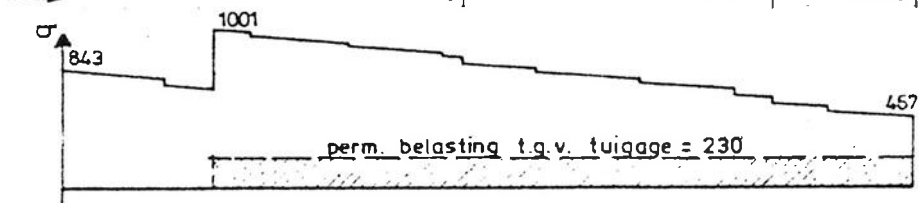
achterplaat



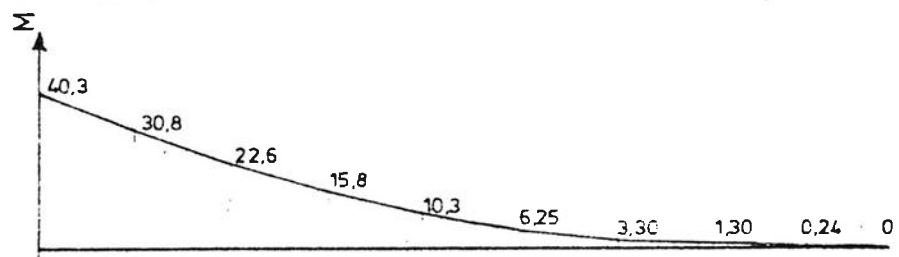
hoekstalen



permanente belasting (N/m')



moment t.g.v. perm. belasting (kNm)



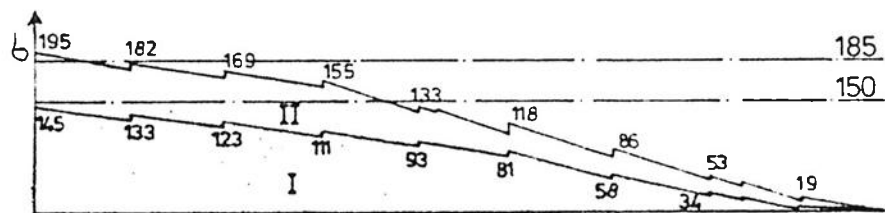
windbelasting

voor windbelasting en -momenten vlgs lijn c; zie rekenvoorbeeld. voor lijn a verloopt de berekening analoog.

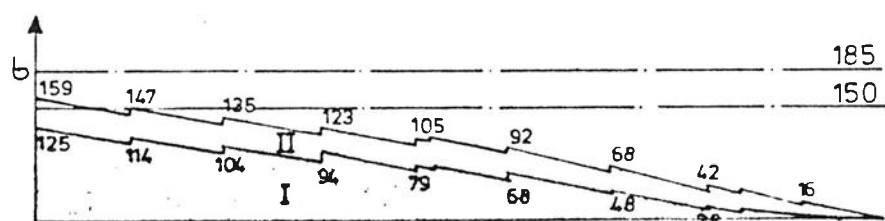
optredende max. spanning (N/mm²) bij lijn c van bijlage III voor:

100 e/min — I
140 .. — II

toelaatbaar is: 150 resp. 185 N/mm²



als boven voor lijn a van bijlage III

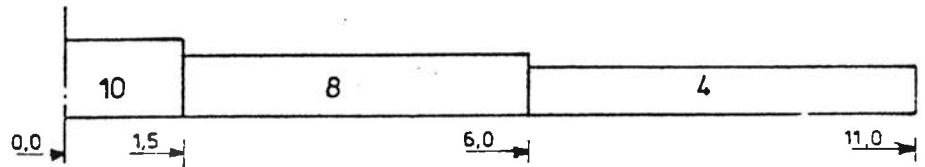


Definitieve roede vlucht 22 m

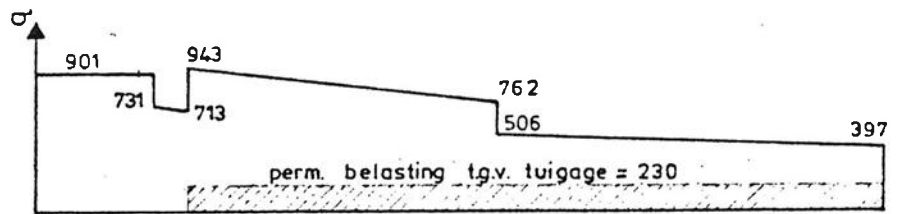
overzicht plaatschema en spanningen, middenzwaarte 330 x 280

konstruktieschema

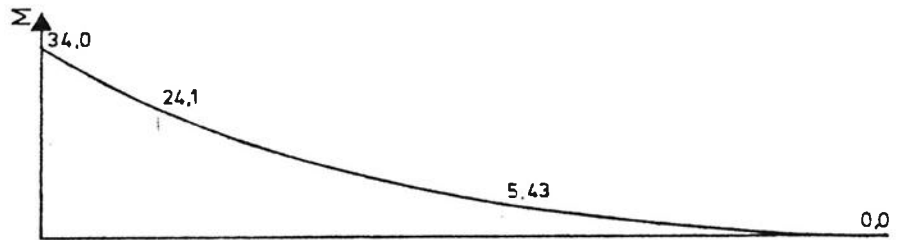
plaatdikten (mm) en afstanden tot de as (m)



permanente belasting (N/m')



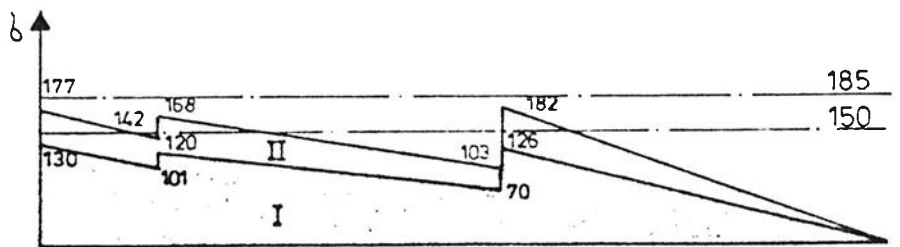
momenten t.g.v. perm. bel. (kNm)



windbelasting

voor windbelasting en -momenten, zie rekenvoorbeeld.

optredende max. spanningen (N/mm²) bij lijn c, bijlage III, voor:
 100 e/min _ I
 140 e/min _ II
 toelaatbaar is:
 150 resp. 185 N/mm²



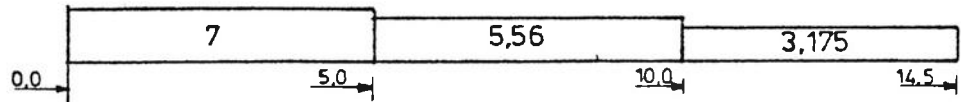
Potroede vlucht 29 m

overzicht plaatschema en spanningen. middenzwaarte 410 x 360

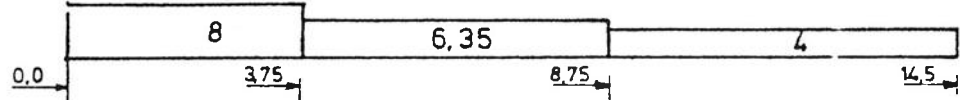
konstruktieschema

plaatdikten (mm) en afstanden tot de as (m)

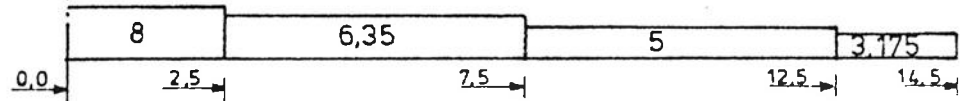
zijplaat



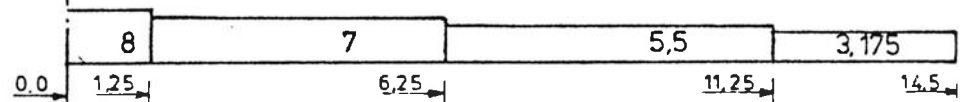
voorplaat



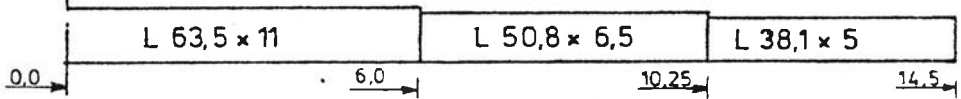
zijplaat



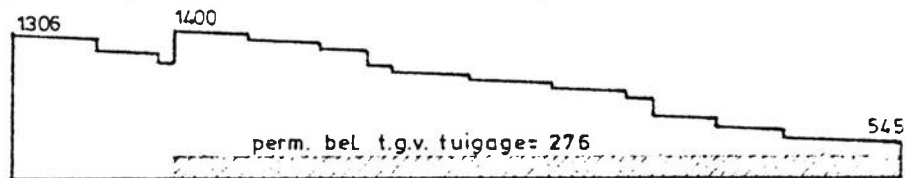
achterplaat



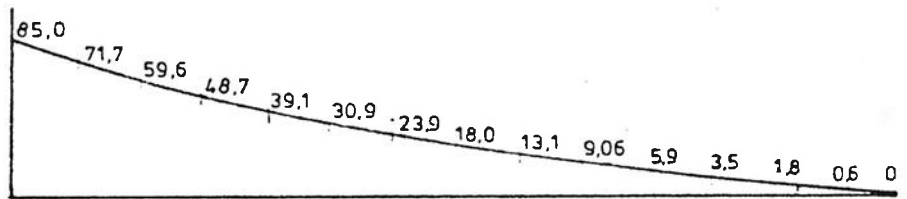
hoekstalen



permanente belasting (N/m²)



moment t.g.v. perm. belasting (kNm)



windbelasting

hier niet aangegeven

optredende max. spanningen (N/mm²) bij lijn c, bijlage III voor:
 100 e/min - I
 140 e/min - II
 toelaatbaar is: 150 resp 185 N/mm²

