

Rotoraerodynamica van horizontale-as windturbines : NEWIN workshop d.d. 16-4-1985

Citation for published version (APA):

Bussel, van, G. J. W., & Kuik, van, G. A. M. (1985). *Rotoraerodynamica van horizontale-as windturbines : NEWIN workshop d.d. 16-4-1985*. (TU Eindhoven. Vakgr. Transportfysica : rapport; Vol. R-738-D), (Technische Hogeschool Delft. Instituut voor Windenergie; Vol. IW-R505). Technische Hogeschool Eindhoven.

Document status and date:

Published: 01/01/1985

Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of Record (includes final page, issue and volume numbers)

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

TECHNISCHE HOGESCHOOL EINDHOVEN



Afdeling der Technische Natuurkunde

Vakgroep TRANSPORTFYSICA

Windenergiegroep

Titel : Rotor-aerodynamica van horizontale-as
windturbines
NEWIN-workshop d.d. 16-4-1985
- Samenvatting van de lezingen en discussies
- Presentatie van resultaten uit berekenings-
methoden.

Auteur : G.J.W. van Bussel*, G.A.M. van Kuik**

Verslagno.: THD rapport: IW-R505/THE rapport: R-738-D

Datum : september 1985



* Instituut voor Windenergie
Technische Hogeschool Delft
Kluyverweg 1
2629 HS DELFT
tel.: 015-785170

** Vakgroep Transportfysica
Afd. der Technische Natuurkunde
Technische Hogeschool Eindhoven
Postbus 513
5600 MB EINDHOVEN
tel.: 040-473437

Inhoud

1.	Inleiding	1
2.	De herziening van de axiale impulstheorie	3
3.	Impulsmodellen	4
3.1	De bladelement-impulsmethode PHATAS	4
3.2	De Viterna & Corrigan correctie op de bladelement-impulsmethode	4
4.	De dragende-lijn methode	6
4.1	De THD-PREDICHAAT dragende-lijn methode	6
4.2	De NLR dragende-lijn methode HELIX	7
5.	Onderlinge vergelijking van de berekeningen	8
5.1	Vergelijking bij een optimale bladinstelling	8
5.2	Vergelijking bij positieve bladverstelling	9
5.3	Vergelijking van de "niet-viskeuze" berekeningen	9
5.4	Vergelijking van de circulatieverdeling over het rotorblad	11
5.5	Vergelijking met metingen	13
6.	Conclusies en aanbevelingen	14
6.1	Conclusies uit de onderlinge vergelijking van de rekenresultaten	14
6.2	Conclusies en aanbevelingen volgend uit de discussies op de workshop	14
7.	Referenties	18
	Tabellen	20
	Figuren	22
	Bijlage I : programma NEWIN workshop	36
	Bijlage II: deelnemerslijst	37

1. Inleiding

De ééndaagse workshop "Rotor aerodynamica van horizontale-as windturbines" gehouden bij het Instituut voor Windenergie van de TH-Delft, had tot doel: een evaluatie van de modellen voor het berekenen van de aerodynamische prestaties van horizontale-as windturbines in uniforme rechte aanstroming.

Hierbij is gekeken naar de in Nederland gangbare modellen. Deze zijn te splitsen in 2 hoofdgroepen, impulsmodellen en wervelmodellen. De laatste categorie kan nog worden onderverdeeld in dragende lijn- en dragende vlakmodellen. De dragende vlak modellen zijn niet aan de orde geweest.

Ze worden, voor zover bekend, in Nederland niet toegepast voor het berekenen van aerodynamische belastingen op windturbine rotoren.

Dragende vlak modellen worden wel gebruikt indien het niet-slanke rotorbladen betreft, zoals schepsschroeven.

De discussie vond plaats naar aanleiding van een viertal presentaties betreffende:

- de geldigheid van de impulsstheorie (G. van Kuik)
- de bladelement-impulsmethode PHATAS (J. Jehee)
- de THD dragende lijn methode PREDICHAT (G. van Bussel)
- de NLR dragende lijn methode HELIX (O. de Vries).

Om naast de presentatie van de modellen ook een onderlinge toetsing van de voorspellingswaarde van de methoden mogelijk te maken, is gevraagd één referentierotor door te rekenen, en de resultaten hiervan op eenduidige manier te presenteren.

De gekozen rotorspecificatie is die van het eerste ontwerp voor de 25 m HAT te Petten. Deze wijkt bij de bladwortel enigszins af van de uiteindelijk gebouwde rotor, de verschillen zijn echter klein.

De specificatie komt overeen met de invoergegevens zoals door het NLR gebruikt in hun programma HELIX (NLR/Petten configuratie).

In dit rapport zal een korte inhoudelijke weergave van de lezingen en de discussies worden gegeven. Een verdergaande analyse van de resultaten uit de aerodynamische modellen zal door de auteurs van dit rapport worden gepresenteerd op de 3e Nationale Windenergie Conferentie, december 1985, Noordwijkerhout, referentie 1.

Na een kort overzicht van de vier inleidingen, en van de bijdrage van Th. van Holten over de Viterna en Corrigan korrektie, zal de onderlinge vergelijking gepresenteerd worden. Ook zal de vergelijking worden gemaakt met meetgegevens van de 25 m HAT, en zullen er enige konklusies volgen,

getrokken uit de bijdragen aan de workshop en de hier gepresenteerde vergelijkingen.

Ter informatie zijn het programma en de deelnemerslijst als bijlagen toegevoegd.

2. De herziening van de axiale impulstheorie

Aan de TH Eindhoven wordt sinds enige tijd onderzoek verricht naar de geldigheid van tot nu toe gedane aannames in de theoretische modellen voor de stroming rond windturbine rotoren (ref. 2).

Eén van de aannames die ter discussie staan, is het concept van de uniform belaste schijf in de axiale impulstheorie.

De meest eenvoudige voorstelling van een windturbine rotor is die van een poreuze schijf die, gelijkmatig belast over het hele oppervlak, de lucht die er doorheen stroomt, afremt. De axiale impulstheorie behorende bij zo'n schijf is de basis van alle impulsmodellen.

Op de rand van de schijf ontspringt het wervelvlak dat de scheiding vormt tussen zog en buitenstroming. Dit ontstaan gaat gepaard met een singulariteit in de wervelsterkte, die zoals bij een discrete wervel een kracht draagt. Deze randkracht is nooit meegenomen in de impulstheorie. Gebeurt dit wel dan zijn de resultaten:

- de gemiddelde snelheid door de rotorschijf worden groter, waardoor ook de C_p toeneemt (zodat $C_p > 0.59$).
- de randkracht wordt via het ^{max} drukveld overgedragen op de stroomlijnen, zodat het toepassen van een impulsbalans per annulus niet juist is, als dit drukveld niet wordt meegenomen.
- het randeffekt is te beschouwen als het slankheidseffekt van vleugels, en gaat gepaard met sterk niet-lineaire snelheidsverdelingen nabij de rand.

De herziene impulstheorie kan momenteel nog slechts kwalitatief beschreven worden, maar kan mogelijk een verklaring bieden voor de afwijkingen tussen meting en berekening van de $C_{D_{ax}}$ van de 25 m HAT (zie fig. 1, 13 en 14).

3. Impulsmodellen

3.1 De bladelement-impulsmethode PHATAS

Bijna alle operationele rekenmethodes zijn gebaseerd op de bladelement-impulstheorie. De meest bekende is PHATAS van ECN (ref. 3).

Een beschrijving van de THE-methode is te vinden in ref. 4; de NLR methode RHO is beschreven in ref. 5. De bladelement-impulsprogramma's van THE, THD, NLR ("RHO") en FDO wijken slechts op onderdelen af, nl. de tipkorrektie en de empirische uitbreiding voor $C_D > 1$.

De methode gaat uit van 2 veronderstellingen: ^{ax}

1. de werking van de bladen wordt verondersteld gelijkmatig over de rotorschijf verdeeld te zijn ("∞ aantal bladen") zodat er geen azimuth-afhankelijkheid is.
2. de toestandverandering van de lucht die door een bepaald ringsegment (annulus) passeert wordt alleen veroorzaakt door de krachten in dat segment (dus de krachten op het bladsegment).

Beide veronderstellingen zijn niet juist. Het eindig zijn van het aantal bladen veroorzaakt een eindig aantal tipwervels op de zogmantel, in plaats van een gesloten wervelvlak. Om dit "lekken" van het wervelvlak te verrekennen zijn o.a. deze Prandtl tipkorrektie factoren ontwikkeld, die neerkomen op het minder effectief laten worden van de buitenste annuli.

Hiermee is nog niets gedaan aan het uitsmeren van de werking van de bladsegmenten over de annulus, en aan "quasi tweedimensionaal" zijn van de bladsegmenten in de annulus (veronderstelling 2).

Het grote voordeel van de methode is de eenvoud, snelheid én redelijke betrouwbaarheid omdat wel aan alle behoudswetten wordt voldaan.

3.2 De Viterna & Corrigan korrektie op de bladelement-impulsmethode

Pas sinds kort is een semi-empirische korrektie ontwikkeld om variaties in spanwijdterichting en in een annulus te verrekenen. De rechtvaardiging voor deze methode (referentie 6) ontbreekt binnen het kader van de impulstheorie, omdat niet meer aan de behoudswetten wordt voldaan.

De nu volgende beschrijving is conform de FDO-methode. Na het bepalen van het evenwicht tussen axiaalkracht en axiale snelheid in het rotorvlak^{*)} met de impulstheorie inclusief tipkorrektie, wordt ter plaatse van het rotorblad een geïnduceerde snelheidsverdeling toegevoegd, volgens de Prandtl-dragende lijn methode

*) In dit programma wordt de axiale snelheid gemiddeld over het hele rotorvlak. Er wordt dus slechts één "annulus" beschouwd.

$$\frac{\Delta v_i}{U} = \frac{C_L}{\pi A} \text{ waarin } A \text{ de slankheid van het rotorblad is.}$$

Dit levert ook een andere $C_{L\alpha}$ en C_{d_i} : de slankheidseffekten worden berekend alsof het blad een vleugel in uniforme stroming is. De Viterna & Corrigan korrektie is te beschouwen als een verrekening van de radiale afhankelijkheid van de bladelementen.

Viterna en Corrigan hebben ook een methode ontwikkeld voor het beschrijven van het (stationaire) gedrag van een rotorblad-profiel in overtrek.

Dit gedrag wijkt af van hetgeen twee-dimensionale metingen laten zien.

Figuur 3 geeft dit weer.

4. De dragende-lijn methode

Bij dragende-lijn methodes worden de (slanke) bladen vervangen gedacht door gebonden wervels, waarvan de sterkte kan variëren in straalrichting. Deze methodes hebben het principiële voordeel dat bijvoorbeeld wel met een eindig aantal bladen wordt gerekend en dat de azimuth- en straalafhankelijkheid impliciet goed gemodelleerd is. De moeilijkheid zit in het a priori onbekend zijn van de vorm van het zog, waarmee het probleem niet-lineair is. De bediscussieerde dragende-lijn modellen hebben het probleem van het "vrije", onbepaalde zog op een verschillende manier proberen te vereenvoudigen om tot een handzame en relatief eenvoudige methode te komen.

4.1 De THD-PREDICHTAT dragende-lijn methode

Deze methode kenmerkt zich op de volgende punten (zie ref. 7):

- De afwijkingen in snelheid t.o.v. de ongestoorde snelheid worden in eerste instantie klein verondersteld. Binnen deze veronderstelling wijkt de echte baan van een luchtdeeltje (een stroomlijn) niet veel af van een rechte lijn.
- Verondersteld wordt, dat de versnelling (de drukgradiënt) die het luchtdeeltje ondervindt, niet veel afwijkt van de drukgradiënt die langs de rechte lijn wordt gevonden. Daarom wordt de drukgradiënt ten gevolge van het roterende dragende-lijn drukveld langs deze rechte geïntegreerd tot aan het rotorblad^{*}). Aangekomen bij het rotorblad is dan een schatting bekend van de snelheid van het luchtdeeltje. Op een zelfde manier is ook een schatting te maken van de snelheid op iedere andere plaats in het rotorvlak (en ook daarbuiten).
- In een tweede iteratie wordt de berekening herhaald, nu met de geschatte snelheid in het rotorvlak als snelheid langs de rechte baan. De banen waarlangs wordt geïntegreerd blijven dus recht en evenwijdig.

Dit laatste herhaalt zich totdat de oude en de nieuwe schatting van de snelheid vrijwel gelijk zijn geworden.

Deze procedure is te beschouwen als een gedeeltelijke ontlegering: de snelheid in het rotorvlak in radiale en axiale richting wordt nog steeds berekend door de drukgradiënt in die richtingen te integreren langs de axiale banen.

De divergentie van de echte banen van de luchtdeeltjes wordt dus niet gemodelleerd.

^{*}) De snelheid langs de integratie-banen is konstant.

Deze methode levert een veel gedetailleerder stroombeeld op dan de impulsmodellen. De beperkingen zitten in het niet goed modelleren van de zogdivergentie (er wordt niet meer voldaan aan de behoudswetten), en het niet in rekening brengen van niet-lineaire radiale en tangentiële snelheidsveranderingen.

4.2 De NLR dragende-lijn methode HELIX

Bij deze methode is het niet-lineaire probleem op een andere manier aangepakt (zie ref. 8):

- De axiale snelheid in iedere doorsnede van de stroombuis achter het rotorvlak, wordt verondersteld konstant te zijn. De tangentiële snelheid wordt verwaarloosd.
- De verandering van de axiale snelheid met de afstand tot de rotorschijf wordt beschreven door een bepaalde functie (polynoom).
- Gekoppeld aan de massa behoudswet, geeft dit de zogdivergentie, en is de kromme bekend waarlangs de wervels in het zog bewegen.

Het wervelsysteem is opgebouwd analoog aan de hoefijzerwervel representatie van een gewone vleugel. Nu de positie van deze wervels in het zog bekend is, kan de snelheid ter plaatse van de dragende lijn uitgerekend worden, en daarmee de sterkte van de dragende lijn. Deze wordt vergeleken met de waarde waarmee gestart is, en via een iteratief proces worden deze gelijk gemaakt.

Het resultaat is dat de zogdivergentie op een "gemiddelde" manier in rekening wordt gebracht maar dat de niet-lineariteit die samenhangt met de tangentiële snelheid en met de verdeling van de axiale en radiale snelheid nog niet wordt meegenomen.

5. Onderlinge vergelijking van de berekeningen

Zoals gezegd is voor de onderlinge vergelijking van resultaten uit de diverse berekeningsmethoden gekozen voor de rotorconfiguratie van het eerste ontwerp voor de 25 m HAT te Petten.

Deze rotor komt kwa geometrie vrijwel overeen met die van de huidige 25 m HAT van het ECN te Petten, en is de representatie zoals door het NLR gebruikt in hun programma HELIX.

De geometrie is gegeven in tabel 1. Verschillen met de "echte" rotor zijn: het ontbreken van een kegelhoek; de positie van de bladwortel nl. op $r = 1,25$ m (in werkelijkheid $r = 1,00$ m); en het wrongverloop aan de binnenzijde van het rotorblad.

De geometrie van tabel 1 geeft een exponentieel verloop over het gehele blad, terwijl in werkelijkheid het gedeelte tussen $r = 1,00$ m en $r = 4,00$ m, gelineariseerd is. Verder wordt aangenomen dat de rotor zich in een uniforme rechte aanstroming bevindt.

De stroming die door het draaiende rotorblad wordt "gevoeld" is daarmee stationair geworden.

Voor het vergelijken van resultaten uit verschillende rekenmethoden is het ook belangrijk dat de aangenomen profielgegevens overeenkomen. Zij hebben namelijk een grote invloed op de prestatiecurve van snellopende rotoren zoals de hier beschouwde NLR/PETTEN rotor.

De gebruikte invoergegevens zijn te vinden in tabel 2. Figuur 2 geeft dezelfde waarden nog eens weer in de vorm van een C_l - α en een C_d - α kromme over het invalshoeken gebied $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$.

5.1 Vergelijking bij een optimale bladinstelling

Als eerste referentiegeval is genomen het aerodynamisch gedrag van deze rotor bij een pitchhoek van 0° .

Met de gegevens van tabel 1 en 2 zijn met de diverse methoden een C_p - λ en een C_D - λ kromme gegenereerd, zie figuur 4 en 5.

Opvallend is het afwijkend gedrag dat voorspeld is met de ECN bladelement-impuls methode PHATAS.

Gezien de analogie van deze methode met de NLR procedure RHO en, in mindere mate met de FDO methode, zijn de verschillen, zowel in C_p - λ als in C_D - λ opmerkelijk.

De overige methoden, inclusief de dragende-lijn representaties HELIX (NLR) en PREDICHAT (THD), leveren een overeenkomend beeld op.

Met een marge in de orde van $\Delta C_p = 0,025$ en van $\Delta C_D = 0,05$ zou door de resultaten uit deze rekenmethoden één prediktie $\overset{ax}{g}$ ekonstrueerd kunnen worden.

5.2 Vergelijking bij positieve bladverstelling

Als tweede en derde referentiegeval zijn genomen de C_p - λ en C_D - λ krommen voor een pitchhoek van $+5^\circ$ en voor een pitchhoek van $+10^\circ$ (positieve pitchverstelling is gedefiniëerd in de richting van vaanstand).

De te verwachten reductie in C_p en C_D bij toename van θ_{pitch} treedt inderdaad op zoals te konstateren valt in de $\overset{ax}{g}$ figuren 6 t/m 9. Opvallend blijft de afwijkende prediktie uit PHATAS voor de vier beschouwde krommen.

Hoewel met een iets grotere marge is het weer mogelijk om uit de voorspellingen van RHO, FDO, HELIX en PREDICHAT per geval één gegeneraliseerde voorspelling te konstrueren.

Interessant is wel dat de overeenkomst in de voorspelling uit de diverse methoden niet toeneemt met toenemende pitchhoek! Dit is in tegenspraak met de verwachting dat bij lagere belastingen (kleinere C_D) en de daarmee gepaard gaande kleinere inductiesnelheden (afnemende invloed van de niet-lineariteit) de predikties van de diverse rekenmodellen wel meer overeen zouden komen.

5.3 Vergelijking van de "niet-viskeuze" berekeningen

Naast de bepaling van een aantal "reële" C_p - λ krommen, is het ook interessant om zogenaamde "niet-viskeuze" berekeningen te maken.

Dit zijn berekeningen waarbij de viskeuze weerstand van het rotorblad nul worden verondersteld ($C_d = 0$ overal). Voor wat de liftcoëfficiënt betreft is er niets veranderd d.w.z. wordt het C_l - α verband uit tabel 2 gehanteerd. Dit is gedaan in overeenstemming met de NLR-konventie.

Een andere keuze, bijv. de potentiaaltheoretische waarde van C_l (met $C_{l_{max}} = \pi^2$) in plaats van de nu genomen viskeuze C_l waarden was wellicht nog interessanter geweest, maar bleek niet meer uitvoerbaar binnen het NLR.

De zo verkregen C_p - λ krommen geven een beter inzicht in de mate waarin de NLR/PETTEN rotor optimaal is ontworpen, volgens de verschillende theorieën.

Vooraleerst blijft duidelijk dat PHATAS ook een afwijkende voorspelling levert voor de niet-viskeuze C_p - λ kromme bij $\theta_{pitch} = 0^\circ$, figuur 10.

Wordt PHATAS buiten beschouwing gelaten dan volgt voor de maximale waarde van de vermogenscoëfficiënt C_p volgens de niet-viskeuze voorspellingen:

$$0,49 \leq C_{p_{\max}} \leq 0,51$$

waarbij de laagste waarde wordt voorspeld door FDO en de hoogste door PREDICHAT.

In de (normale) viskeuze situatie geldt:

$$0,43 \leq C_{p_{\max}} \leq 0,455$$

weer met de laagste waarde uit de FDO voorspelling en de hoogste uit PREDICHAT.

Voor de waarde van λ waarbij de maximale C_p wordt gehaald, de optimale snellopendheid λ_{opt} ,

$$\begin{aligned} \text{geldt:} \quad & 9 \leq \lambda_{\text{opt}} \leq 10 && \text{niet viskeus} \\ & 8 \leq \lambda_{\text{opt}} \leq 9 && \text{viskeus} \end{aligned}$$

voor een pitchhoek van nul graden: $\theta_{\text{pitch}} = 0^\circ$.

Helaas bleek bij de presentatie van de resultaten dat het NLR het niet-viskeuze referentiegeval niet had doorgerekend met haar HELIX-programma. Juist omdat er in het viskeuze geval (fig. 4) een grote overeenkomst was tussen de RHO en de HELIX voorspelling voor wat betreft C_p - λ , had een vergelijking in het niet-viskeuze geval meer informatie kunnen geven over de mate van toevalligheid van de overeenkomst in figuur 4.

Dat er een ander beeld kan ontstaan over de overeenkomst van twee voorspellingen, laat en vergelijk van RHO met de FDO methode zien.

In het viskeuze geval is de overeenkomst in C_p - λ voorspelling goed te noemen, voor lagere λ 's ($4 \leq \lambda \leq 6$) zelfs zeer goed (figuur 4).

In de niet viskeuze situatie, figuur 10, is er overal een behoorlijke discrepantie waar te nemen.

5.4 Vergelijking van de circulatieverdeling over het rotorblad

Naast een vergelijking van de voorspelde globale karakteristieken ($C_{P-\lambda}$ en $C_{D-\lambda}$ krommen) is ook gevraagd aan de beheerders van de diverse berekeningsmethoden, om in het ontwerppunt van de 25 m HAT ($\lambda = 8$; $\theta_{pitch} = 0^\circ$) de aerodynamische belasting over het rotorblad te bepalen.

De verdeling van luchtkrachten over de spanwijdte van het rotorblad kan op een aantal manieren worden gekarakteriseerd. Bladelement-impuls methoden maken gebruik van de bekende profielparameters C_l en C_d ; de lift- en weerstandscoefficiënt. Wervelmethoden, zoals de NLR methode HELIX, gebruiken de wervelsterkte, ofwel de circulatie om de luchtkracht te representeren.

Het verband tussen C_l , de belangrijkste luchtkracht op het rotorblad-profiel en de circulatie Γ wordt gegeven door:

$$C_l \cdot \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 \cdot c = \rho U_{rel} \Gamma,$$

Dus met $\Gamma = C_l \cdot \frac{1}{2} U_{rel} \cdot c$ kan de circulatie onmiddellijk worden bepaald uit de liftcoëfficiënt C_l .

In bovenstaande formules wordt met U_{rel} de relatieve windsnelheid bedoeld ter plaatse van het beschouwde rotorblad-profiel; ρ is de luchtdichtheid en c de koorde van het profiel. Omdat de rotatiecomponent Ωr verreweg de belangrijkste is in U_{rel} , geldt bij benadering:

$$\frac{\Gamma}{UR} = C_l \cdot \frac{1}{2} \lambda \cdot \frac{r}{R} \cdot \frac{c}{R}$$

Hiermee kan de (dimensieloze) circulatieverdeling direkt worden vertaald naar een C_l verdeling.

Gevraagd was de circulatieverdeling te geven die uit de betreffende methode volgt, in het ontwerppunt. Deze verdelingen zijn samengevoegd in figuur 11. De corresponderende C_l verdelingen volgens bovenstaande formule zijn gegeven in figuur 12.

In deze twee figuren blijkt opnieuw dat er "iets" aan de hand is met de berekeningen uit PHATAS.

Vooraf de C_l -verdeling (figuur 12) geeft een beeld dat in de richting van (numerieke) instabiliteit wijst. In ieder geval is een dergelijk wild verloop van de liftcoëfficiënt-verdeling fysisch niet verklaarbaar.

Terugkerend naar figuur 11, de (dimensieloze) circulatieverdeling, valt op dat alleen PREDICHAT een wervelsterkte 0 voorspelt aan de tip en de wortel.

Dit heeft rechtstreeks te maken met de wijze van modelleren die gevolgd is bij de diverse methoden.

Alle theoretische modellen, op PREDICHAT na, gebruiken een discretisatie van het rotorblad. Ofwel in de vorm van bladelementen (RHO, PHATAS en FDO) ofwel in de vorm van "panelen" (HELIX). De circulatie wordt per element (of paneel) constant verondersteld, en daarom eindigt $\frac{\Gamma}{UR}$ bij deze methoden aan de tip en de wortel op een positieve waarde.

Bij PREDICHAT echter wordt gebruik gemaakt van zgn. basis liftverdelingen, die ieder op zich al het juiste karakter hebben, zie ref. 7. Hierbij hoort de lift-afval tot nul aan tip en wortel (en hiermee ook een dergelijk gedrag voor de circulatie).

De samengestelde liftverdeling, bepaald door de beschouwde configuratie, heeft dan uiteraard ook een dergelijk gedrag.

Met de FDO-methode wordt duidelijk de laagste voorspelling gevonden voor de sterkte van de circulatie op het rotorblad. Dit is in overeenstemming met de prestatievoorspelling door de FDO methode in het ontwerppunt, die ook het laagst is (figuur 4) als tenminste de PHATAS voorspelling niet wordt meegeteld.

De circulatieverdeling heeft een nog direktere relatie met de axiale weerstand. Op basis hiervan mag verwacht worden dat de FDO-methode ook de laagste voorspelling levert voor de axiale weerstandscoefficiënt C_D (zie figuur 5). Dit is echter niet het geval, integendeel, de FDO-methode voorspelt in het ontwerppunt juist een relatief hoge C_D -waarde.

Een mogelijke verklaring hiervoor is de extra aangenomen inductiesnelheid met het Viterna en Corrigan model, waardoor de Γ -vector (loodrecht op U_{rel}) wat meer in axiale richting gekanteld is dan bij de overige methoden.

In de C_ℓ -verdelingen ten slotte (figuur 12) zijn dezelfde tendenzen als boven besproken waar te nemen. Dit figuur is met name interessant met betrekking tot de constantheid van de verdeling.

Immers, in een ideaal ontwerp wordt gestreefd naar één constante C_ℓ -waarde over een zo groot mogelijk deel van het rotorblad.

Blijft het binnenste deel van het blad buiten beschouwing (het gedeelte waarvoor geldt $\frac{r}{R} < 0,3$ is nauwelijks interessant voor wat betreft het aandeel in het vermogen) dan voorspellen alle methoden dat de NLR/Petten configuratie een C_ℓ -verloop heeft dat vrij dicht bij de optimale C_ℓ ligt (voor $\lambda = 8$).

Opvallend blijft (ook in fig. 11) de treffende overeenkomst tussen de voorspellingen met de beide NLR-methoden (RHO en HELIX).

5.5 Vergelijking met metingen

Aan het begin van dit hoofdstuk is reeds duidelijk gemaakt dat de berekende configuratie niet geheel overeenstemt met de rotor waaraan in Petten de nodige metingen zijn verricht (referenties 9 en 10).

De verschillen in geometrie zijn echter gering, en er wordt niet verwacht dat ze een belangrijke verandering zouden tewerkstellen in de berekende waarden.

Daarom zijn in figuur 13 en 14 de berekende C_p resp. $C_{D_{ax}}$ waarden vergeleken met de metingen, voor een pitchhoek $\theta_{pitch} = 0^\circ$.

Op de berekeningen met PHATAS na (die zoals eerder gezegd met enig wantrouwen moeten worden bekeken) vallen alle meetpunten onder de voorspelde C_p én $C_{D_{ax}}$ waarden. Dit geldt voor alle overige methoden (RHO, FDO, HELIX en PREDICAT) voor alle λ 's.

Aan de discrepantie voor de C_p waarden is wel het één en ander te doen. Zo zijn er wel argumenten te vinden om de viskeuze weerstand van het profiel hoger aan te nemen dan de waarden van tabel 2. Ook is misschien wel een basis voor de veronderstelling dat het gedrag rond $C_{l_{max}}$ anders is dan in tabel 2.

Met het nodige passen en meten is op zo'n manier wel een overeenkomst te forceren tussen theorie en praktijk.

Echter, ook dit soort truks werken niet om een overeenstemming tot stand te brengen tussen de $C_{D_{ax}}$ metingen en berekeningen.

Ofwel de onderliggende theorie van alle modellen is niet volledig, ofwel de metingen zijn fout. Aan het eerste wordt gewerkt zoals ondermeer bleek in hoofdstuk 2. Ook wordt naar aanleiding van de workshop, bij het ECN naarstig gezocht naar eventuele meetfouten.

Wat dit laatste betreft zijn er enige, misschien verdachte punten aan te wijzen in het meetsysteem. Verwacht wordt dat er op de Nationale Windenergie Conferentie 1985 te Noordwijkerhout een paper gepresenteerd zal worden over de, mogelijk herziene, meetresultaten (ref. 11).

Tevens is een rapport hierover in voorbereiding (ref. 12).

6. Conclusies en aanbevelingen

Tijdens de workshop bleek het onmogelijk om alle vergelijkingen zoals gepresenteerd in de figuren 4 t/m 14 aan de orde te stellen.

In feite is toen alleen figuur 13 getoond. De andere resultaten zijn vaak wel bij de bespreking van de afzonderlijke methoden gepresenteerd. In verband hiermee is dit hoofdstuk verdeeld in twee paragrafen. In de eerste paragraaf worden conclusies getrokken die rechtstreeks volgen uit de vergelijkingen getoond in de figuren 4 t/m 12. De tweede paragraaf bevat de conclusies en aanbevelingen zoals verwoord aan het slot van de workshop.

6.1 Conclusies uit de onderlinge vergelijking van de rekenresultaten

Vergelijken van de globale karakteristieken (C_p - λ en C_D - λ krommen) uit de berekeningsmethoden over de drie beschouwde gevallen ($\theta_{pitch} = 0^\circ, 5^\circ$ en 10°) levert het volgende beeld.

- De PHATAS resultaten leveren in alle gevallen een beeld op dat afwijkt van de overige voorspellingen. De C_p - λ en C_D - λ krommen lijken alle verschoven naar hogere waarden van λ .
Bovendien wordt voor $\theta_{pitch} = 0^\circ$ én $\theta_{pitch} = 5^\circ$ de waarde voor $C_{p_{max}}$ veel hoger geschat.
Het vermoeden bestaat dat de afwijkingen gezocht moeten worden in programmeerfouten, zodat de resultaten uit PHATAS bij de overige punten niet in beschouwing worden genomen.
- Er is geen duidelijke overeenstemming te constateren tussen de resultaten uit de impulsmethoden RHO en die van FDO.
- De resultaten uit de beide dragende-lijn-methoden HELIX en PREDICHAT vertonen een nog minder overeenkomstig gedrag.
- Er is een goede overeenstemming tussen de voorspellingen uit de beide NLR methoden, zowel voor wat betreft C_p als voor C_D .
- De prestatieschattingen (C_p - λ krommen) uit de FDO^{ax}-methode leveren waarden die wat lager zijn dan het gemiddelde uit de beschouwde vier methoden (RHO, FDO, HELIX, PREDICHAT).
- RHO en HELIX leveren C_p waarden die wat boven het gemiddelde liggen.
- De waarden voor C_D worden met PREDICHAT systematisch lager geschat dan met de overige^{ax} methoden. HELIX schattingen zijn weer wat hoger dan het gemiddelde.

Bij het vergelijken van de aerodynamische belasting over het rotorblad (Γ/UR verdeling en C_{ℓ} verdeling) is het volgende te concluderen:

- De PHATAS voorspellingen leveren ook hier een beeld op dat doet denken aan onjuistheden in het berekeningsprogramma.
- Er is op het belangrijke buitendeel van het rotorblad een redelijke overeenstemming in de voorspellingen.
- Afwijkingen voorspeld door PREDICHAT over het gedrag aan tip en wortel zijn het gevolg van een afwijkende modellering, die eist dat de $\frac{\Gamma}{UR}$ en de C_{ℓ} verdeling naar nul gaat (een overigens fysisch korrekte voorwaarde).
- De relatief lage $\frac{\Gamma}{UR}$ -waarden voorspeld door de FDO-methode resulteert niet in een relatief lage C_D voorspelling. Wellicht is dit te verklaren met de aangenomen extra inductiesnelheden in deze methode.
- Alle methoden voorspellen in de ontwerpsituatie ($\lambda = 8$, $\theta_{pitch} = 0^\circ$) een C_{ℓ} verloop dat op het buitendeel van het blad dicht bij de optimale C_{ℓ} ligt.

6.2 Conclusies en aanbevelingen volgend uit de discussies op de workshop

Aan het eind van de workshop werd de vergelijking gepresenteerd van de voorspelde C_p - λ krommen met de gemeten waarden, in het geval $\theta_{pitch} = 0^\circ$ (fig. 13).

De bijbehorende figuur 14 was op dat moment nog niet beschikbaar, echter in de presentaties van de diverse methoden was wel reeds de discrepantie tussen berekende en gemeten C_D waarden geconstateerd.

Samen met de discussies over de inhoud van de verschillende methoden leverde dit de volgende conclusies en aanbevelingen op:

- Theorie en experiment liggen teveel uiteen om met enige betrouwbaarheid de prestaties van nieuwe ontwerpen te kunnen voorspellen.
- Onderzoek op het gebied van de rotoraerodynamica dient beslist te worden gecontinueerd. Zo zijn voor opbrengstberekeningen de absolute waarden van C_p belangrijk en voor belastingsberekeningen die van C_D . Geen van beide kan op dit moment voldoende nauwkeurig worden geschat.

Ook eenvoudige correctiefactoren op de berekeningen lijken geen soelaas te bieden: iedere variatie van λ of θ_{pitch} vereist een andere waarde.

- Er zijn geen goede experimenten verricht om de hier gepresenteerde theoretische modellen op een juiste manier te kunnen beoordelen, zonder dat twijfel mogelijk is over de resultaten van de experimenten.

De resultaten uit Petten, ook al blijken deze "juist" te zijn, zijn vergaard in een aanstroming die beslist niet recht en uniform genoemd kan worden (windshear en fluctuaties in snelheid en richting).

Veel model experimenten, uitgevoerd onder gecontroleerde omstandigheden in het laboratorium, vonden plaats in een gesloten windtunnel. Hierdoor zijn correcties nodig voor de tunnelblokkering waarmee de eenduidigheid van de experimenten weer ter discussie staat. Daarom is het nodig dat er een serie experimenten wordt uitgevoerd met een model-rotor onder ideale omstandigheden. Hieronder wordt verstaan een zeer grote (of een open) windtunnel, of een opstelling waarbij het model in een eenparige beweging door stilstaande lucht getrokken kan worden (bijv. in een grote, lange hal). De resultaten uit deze experimenten kunnen dan een "data-base" vormen waarmee alle methoden, met hun toekomstige modificaties kunnen worden getoetst.

- Met deze modelturbine, de dan bekende ideale rotorkarakteristiek en de hiermee gegenereerde database kan bovendien worden nagegaan wat de invloed is van de diverse windtunnel configuraties op de meetresultaten.
- Speculaties over de oorzaak van de verschillen tussen metingen en berekeningen van C_p zoals vaak waargenomen (ook hier, getuige fig. 13) wijzen in de richting van modificaties van de (twee-dimensionale) profielgegevens. Een remedie wordt dan gezocht in het toepassen van andere (ook twee-dimensionale) metingen, bijv. met een ander Reynoldsgetal, of voor een andere ruwheid.

De werkelijke oorzaak van de discrepantie zou wel eens kunnen zitten in de onmogelijkheid van het toepassen van twee-dimensionale meetgegevens, door drie dimensionale effecten die niet verwaarloosd kunnen worden (kromming van de relatieve aanstroming, zogeeffecten, centrifugaaleffecten in de grenslaag, tipeffecten etc.).

- De afwijkingen die de resultaten uit PHATAS hebben ten opzichte van de andere methoden zijn niet te verklaren. De methode dient te worden gecontroleerd op programmeerfouten, en op fouten in de invoergegevens. Bovendien is het aan te bevelen het onderliggende theoretische model eens kritisch te beschouwen, en vooral te vergelijken met de andere bladelement impuls methoden RHO en FDO.
 - De verschillen tussen berekeningen en metingen voor de beschouwde configuratie (fig. 13 en 14) zijn groter dan mag worden verwacht op basis van de verschillen in aangenomen en echte geometrie, en de niet uniformiteit in de aanstroming. Met name de afwijking in axiaalkracht is onverklaarbaar te noemen.
- Bovendien circuleren er afwijkende meetgegevens van de 25 m HAT te Petten, die hier niet zijn vermeld (metingen 1984).

Dit maakt het zeer gewenst dat er contact gelegd wordt met de 25 m HAT meetgroep van het ECN, teneinde de invoergegevens te verifiëren en de meetsystemen te controleren.

Op de Nationale Windenergie Conferentie 1985 te Noordwijkerhout zal vermoedelijk de "waarheid" aan het licht komen voor wat betreft de metingen (ref. 11).

Ook zal er een memorandum verschijnen met de nieuwste versie van de gemeten waarden voor C_p en C_D (ref. 12).

Ten tijde van het schrijven^{ax} van dit rapport waren deze gegevens helaas nog niet beschikbaar.

7. Referenties

1. G.J.W. van Bussel : De 25 m HAT als testcase voor de in
G.A.M. van Kuik : Nederland gangbare aerodynamische reken-
modellen voor snellopers, paper 44, Natio-
nale Windenergie Conferentie 1985, decem-
ber 1985, Noordwijkerhout.
2. G.A.M. van Kuik : A revision of the actuator disc concept
and momentum theory. Report R-732-D, augus-
tus 1985, TH Eindhoven, afd. der Technische
Natuurkunde, vakgroep Transportfysica.
3. J.N.T. Jehee : PHATAS, Een programma voor horizontale-as
E. van der Goot : windturbines. Beschrijving en toepassingen,
paper B-8, Nationale Windenergie Conferentie
1983, september 1983, Noordwijkerhout
(ECN 83-153).
4. K. Heil : Theoretische en experimentele bepaling van
het gedrag van windrotoren met horizontale
as, rapport R-365-A, februari 1979, TH Eind-
hoven.
5. O. de Vries : The aerodynamic performance of a horizontal-
axis windturbine in a stationary parallel
flow rapport TR 78084L, juli 1978, Nationaal
Lucht- en Ruimtevaart Laboratorium.
6. L.A. Viterna : Fixed pitch rotor performance of large hori-
R.D. Corrigan : zontal axis wind turbines, NASA Lewis Research
Center, Cleveland, Ohio.
7. G.J.W. van Bussel : First order performance calculations of wind-
turbine rotor using the method of acceleration
potential, Report IW-R522, 1985, Instituut voor
Windenergie, TH Delft.
8. W.J. Piers : A nonlinear lifting line method for the calcu-
lation of the flow around a rotating system.
Part 1: The conventional wind turbine, rapport
TR 85052L, maart 1985, Nationaal Lucht- en Ruim-
tevaartlaboratorium.

9. J.W.M. Dekker : A horizontal axis windturbine after 8000
F. Lekkerkerker hours of operation, paper gepresenteerd op de
C.J. Looijesteijn op de 4e Europese Windenergie Conferentie,
C.M. de Groot oktober 1984, Hamburg.
H.Ch. Rieffe
10. J.W.M. Dekker : Relevantie 25 m HAT experimenten, rapport
C.M. de Groot 83-115 (restricted distribution), juli 1983,
H.Ch. Rieffe ECN Petten.
11. J.W.M. Dekker : Bepaling van vermogens en axiaalkrachtcoëffi-
ciënten van de 25 m HAT te Petten, paper 62,
Nationale Windenergie Conferentie 1985, decem-
ber 1985, Noordwijkerhout.
12. J.W.M. Dekker : Bepaling van vermogens- en axiaalkracht coëffi-
C.M. de Groot ciënten van de 25 m HAT, ECN, Petten rapport
85-151 (restricted distribution), september 1985,
ECN Petten.

- Situatie: rechte aanstroming, geen windshear
- Aantal bladen: 2
- Geen kegelhoek van de rotor
- Rotoras evenwijdig aan ongestoorde stromingsrichting
- Verhouding $\frac{\text{spanwijdte rotorblad}}{\text{rotorstraal}} = \frac{b}{R} = 0,90$
- Koorde verloop, met $\frac{\text{bladkoorde}}{\text{rotorstraal}} = \frac{c}{R}$:

$$\frac{c}{R} = 0,16 - 0,136 \frac{r}{R}$$

waarin $\frac{r}{R}$ de dimensieloze lokale straal is.

- Wroegverloop θ in graden:

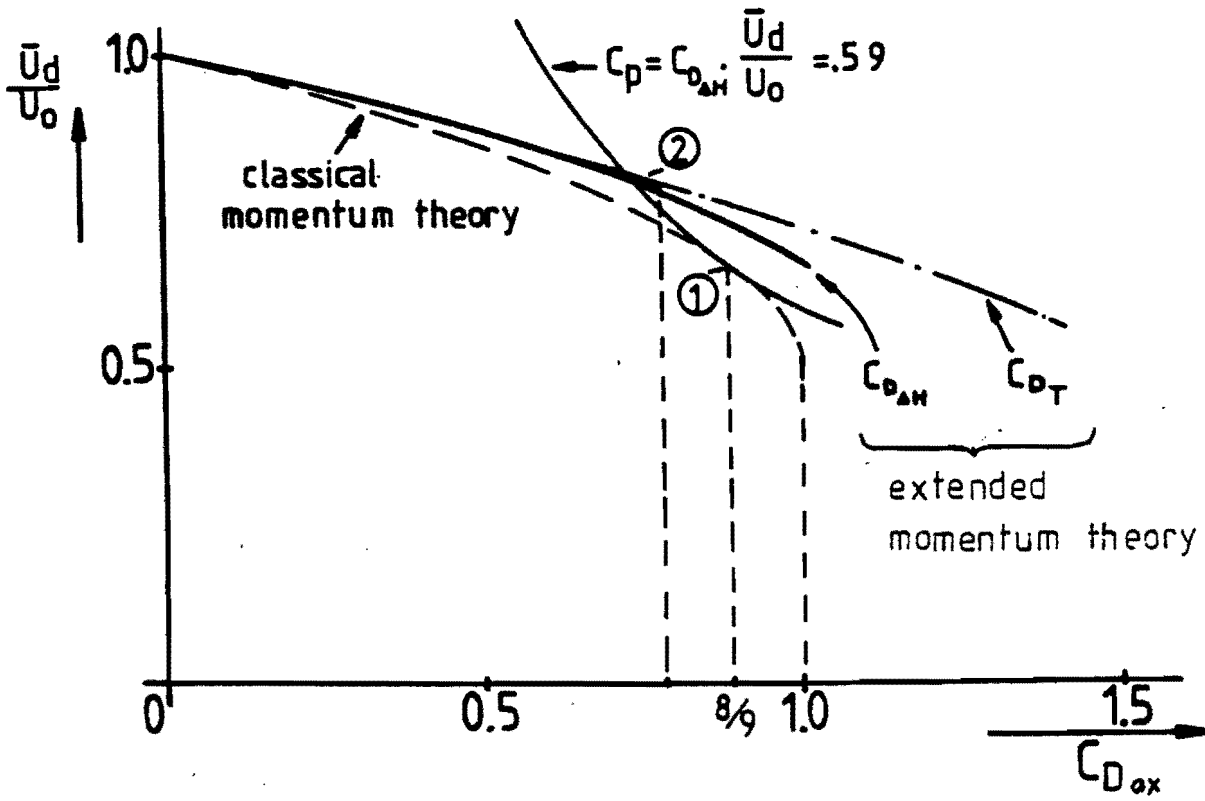
$$\theta\left(\frac{r}{R}\right) = 11,38 \left(\frac{r}{R}\right)^{-0,487} - 15 \quad (^\circ)$$

dit is het verloop van de hoek tussen de koordelijne van het profiel en het rotorvlak, bij $\theta_{\text{pitch}} = 0^\circ$.

α	c_l	c_d
-90	-0.10	1.8000
-85	-0.29	1.7905
-80	-0.44	1.7620
-75	-0.61	1.7148
-70	-0.75	1.6492
-65	-0.87	1.5658
-60	-0.96	1.4651
-55	-1.04	1.3479
-50	-1.08	1.2151
-45	-1.10	1.0678
-40	-1.08	0.9070
-35	-1.04	0.7339
-30	-0.96	0.5500
-25	-0.87	0.3565
-20	-0.80	0.1950
-18	-0.90	0.1337
-17	-1.00	0.1100
-16	-1.10	0.0919
-15	-1.20	0.0743
-14	-1.20	0.0588
-12	-1.10	0.0344
-10	-0.90	0.0189
- 8	-0.80	0.0121
- 6	-0.60	0.0103
- 4	-0.30	0.0089
- 2	-0.10	0.0080

α	c_l	c_d
0	0.11	0.0076
2	0.31	0.0076
4	0.50	0.0080
6	0.70	0.0089
8	0.89	0.0103
10	1.08	0.0121
12	1.26	0.0189
14	1.37	0.0344
15	1.40	0.0455
16	1.29	0.0588
17	1.19	0.0743
18	1.10	0.0919
20	0.96	0.1551
25	0.87	0.3565
30	0.96	0.5500
35	1.04	0.7339
40	1.08	0.9070
45	1.10	1.0678
50	1.08	1.2151
55	1.04	1.3479
60	0.96	1.4651
65	0.87	1.5658
70	0.75	1.6492
75	0.61	1.7148
80	0.44	1.7620
85	0.29	1.7905
90	0.10	1.8000

Tabel 2: Aerodynamische karakteristieken van het NACA 23018 profiel bij een Reynoldsgetal $R_e = 2 \times 10^6$ zoals gebruikt in de berekeningen.



Bij dezelfde bruto C_p (niet-viskeus), bijvoorbeeld $C_p = 0.59$, hoort volgens de klassieke impulstheorie een hogere $C_{D_{ax}}$ dan volgens de "nieuwe" theorie (punten 1 en 2 resp.)^{ax}.

Fig. 1: De werklijn van de klassieke en "nieuwe" impulstheorie.

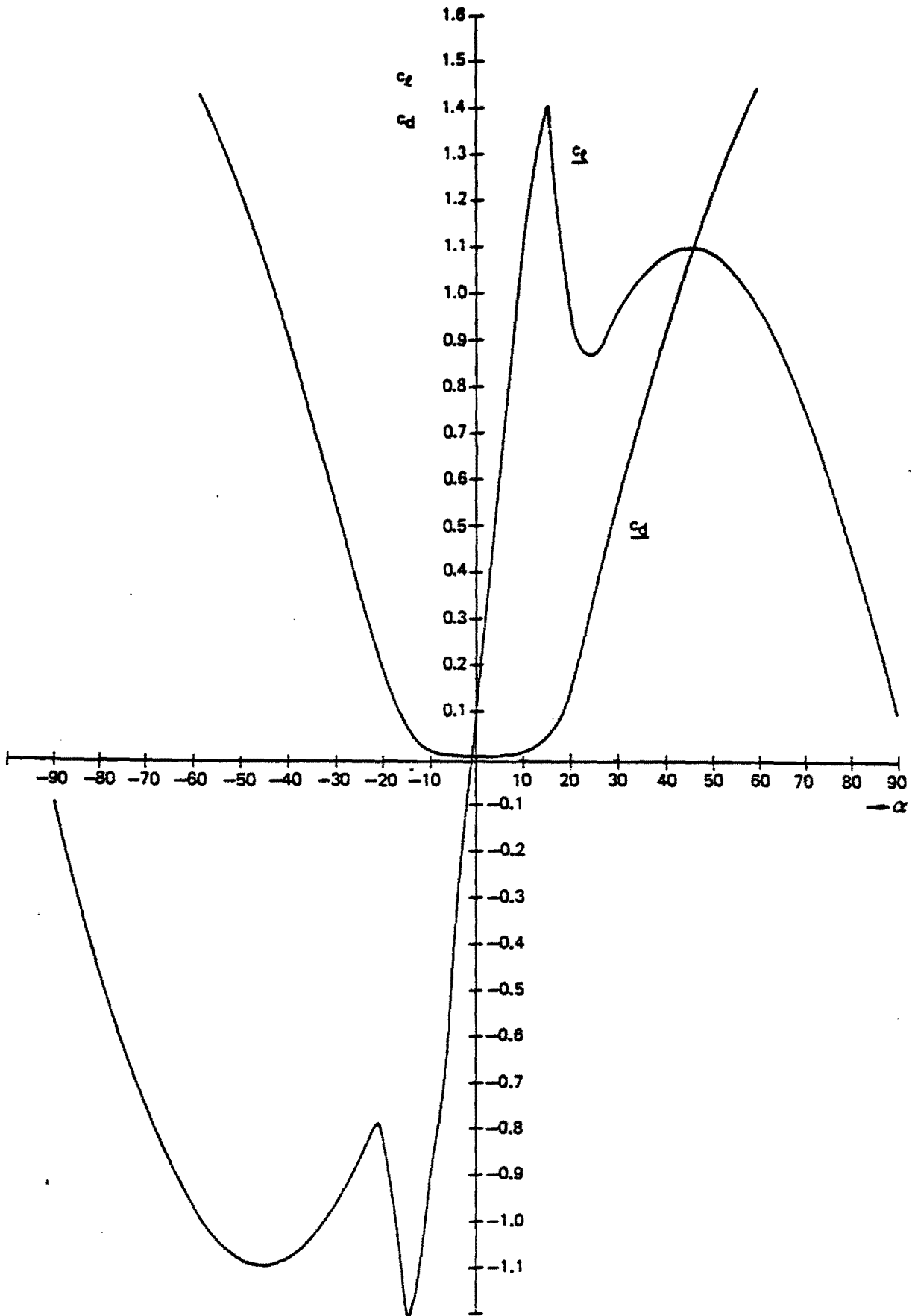


Fig. 2: Aerodynamische karakteristieken van het NACA 23018 profiel bij een Reynoldsgetal $R_e = 2 \times 10^6$.

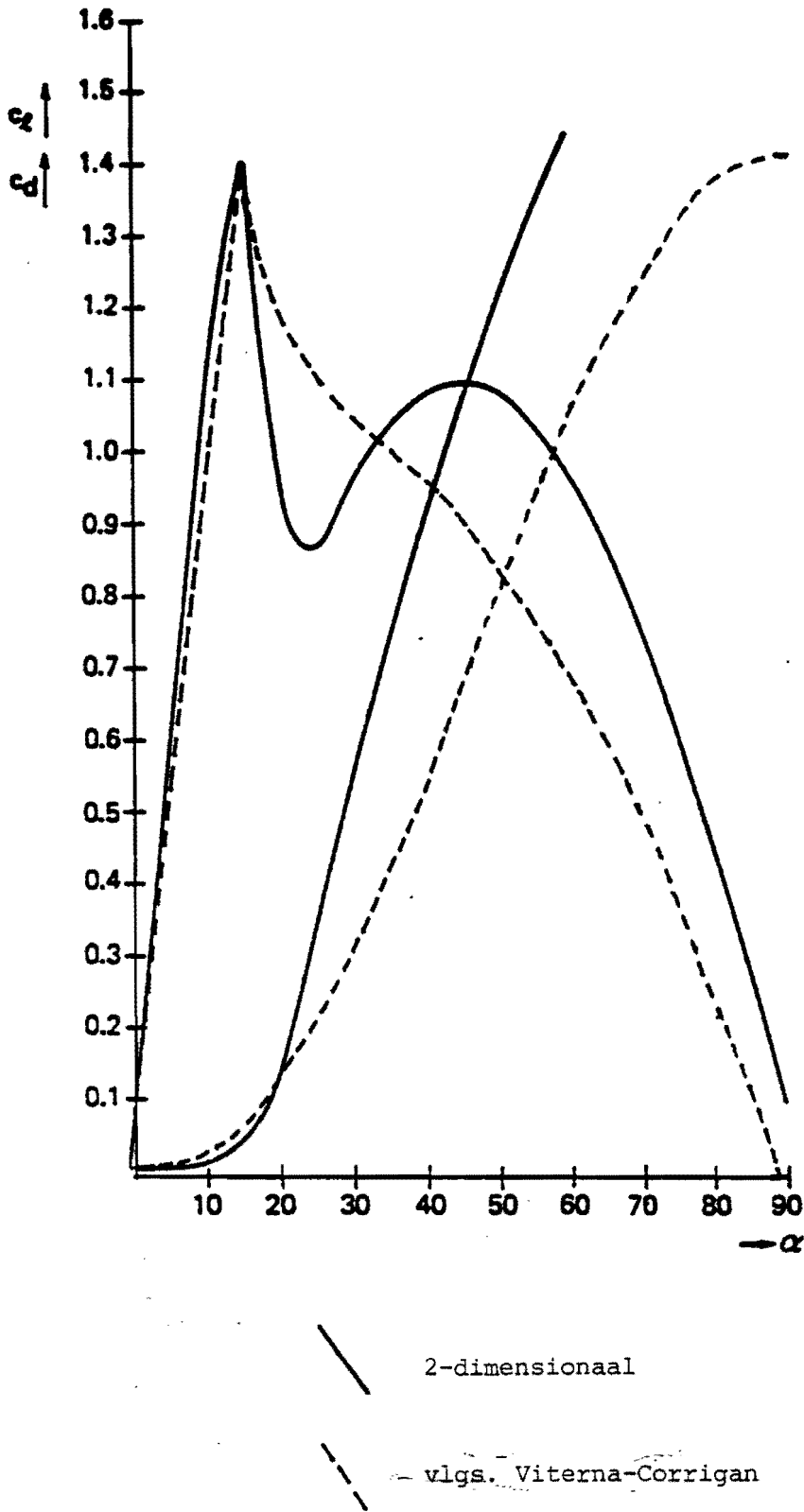


Fig. 3: C_l - α en C_d - α krommen volgens tabel 2 (NACA 23018; $R_e = 2 \times 10^6$) en de modificatie conform de methode van Viterna en Corrigan.

NLR/PETTEN configuratie

$\theta_{pitch} = 0^\circ$

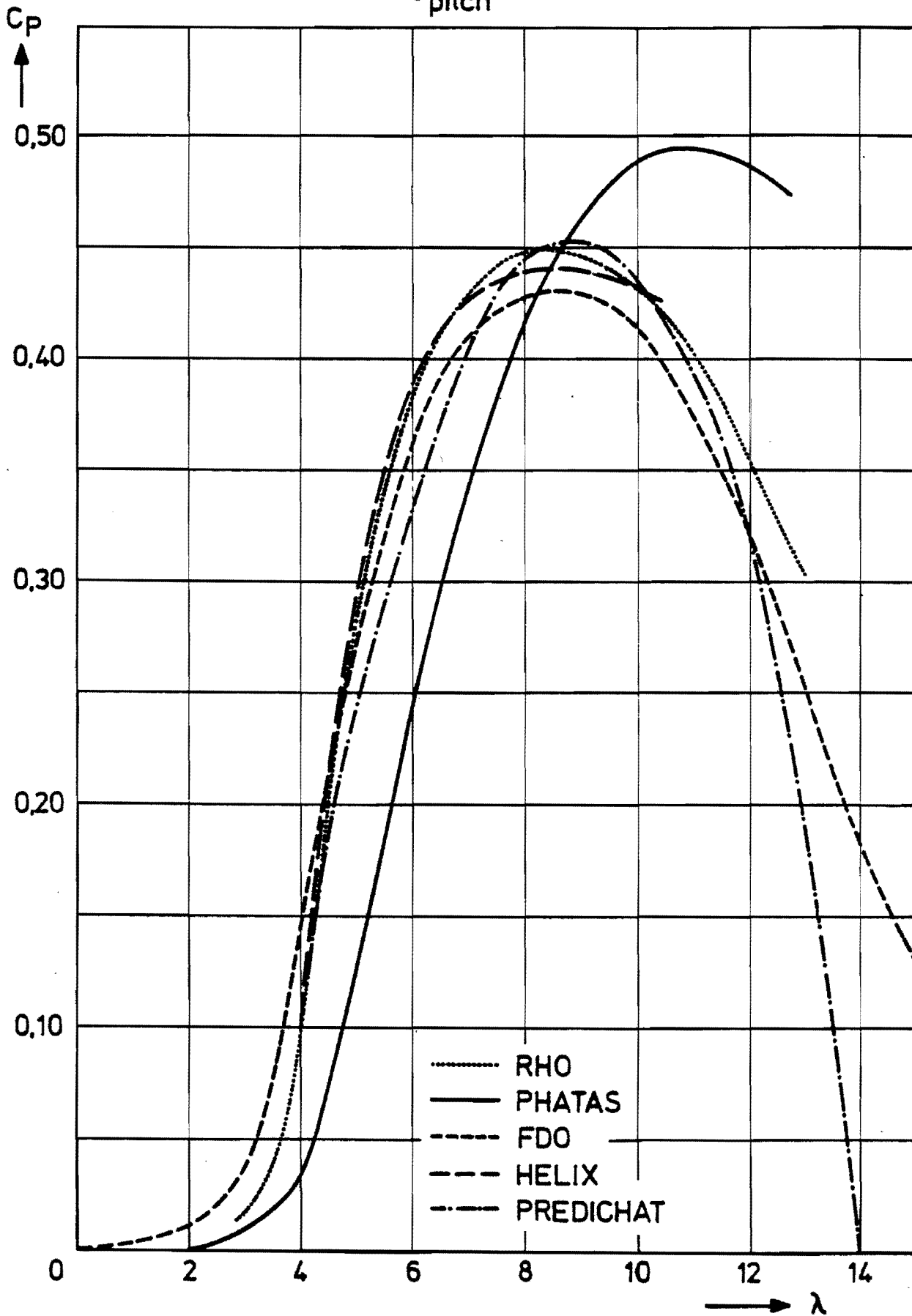


Fig. 4: Berekende C_p - λ krommes voor de configuratie van tabel 1 voor de optimale bladhoek ($\theta_{pitch} = 0$).

NLR/PETTEN configuratie
 $\theta_{pitch}=0^\circ$

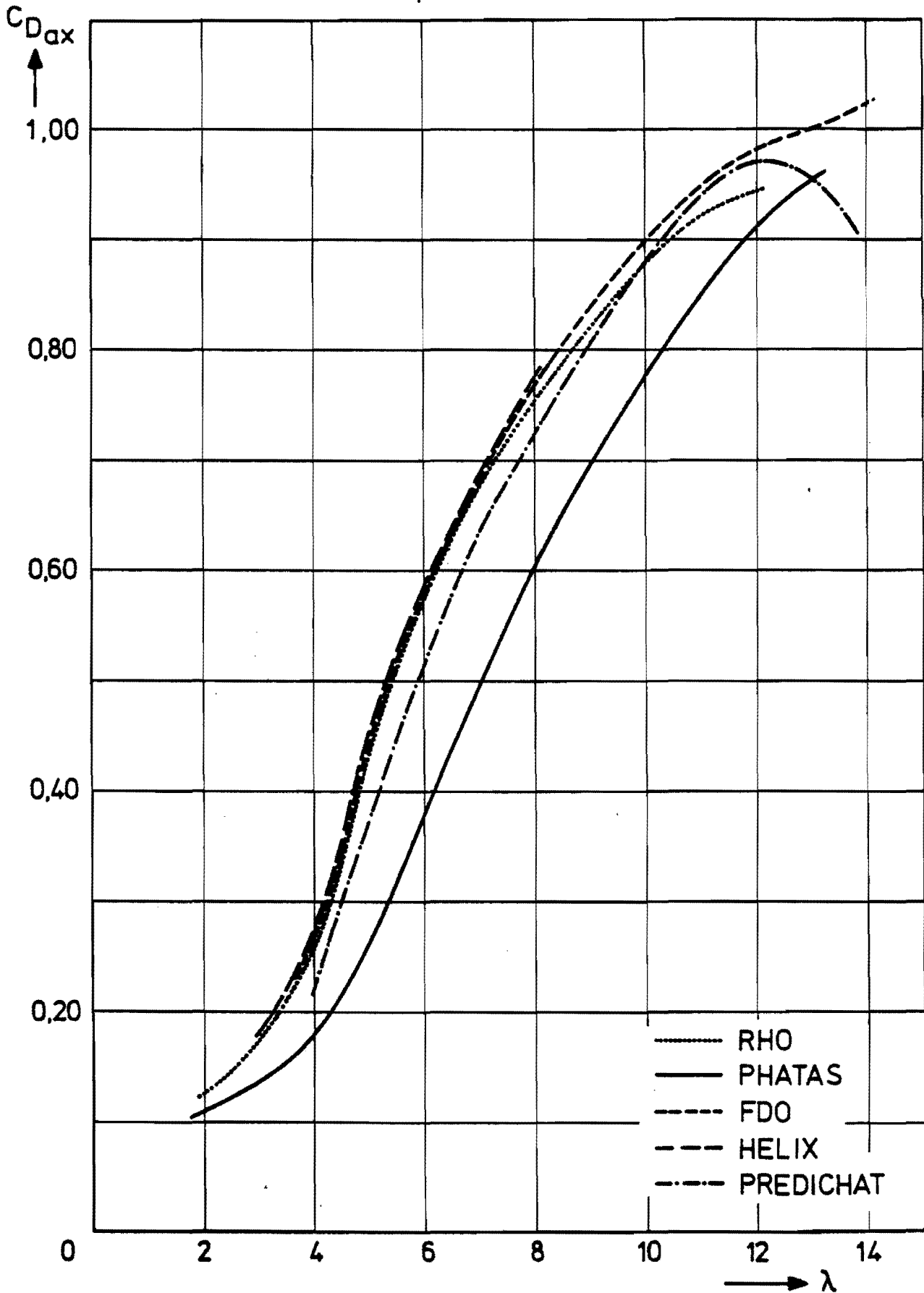


Fig. 5: Berekende $C_{D_{ax}}$ - λ krommes voor de configuratie van tabel 1, voor de optimale bladhoek ($\theta_{pitch} = 0^\circ$).

NLR/PETTEN configuratie
 $\theta_{pitch} = 5^\circ$

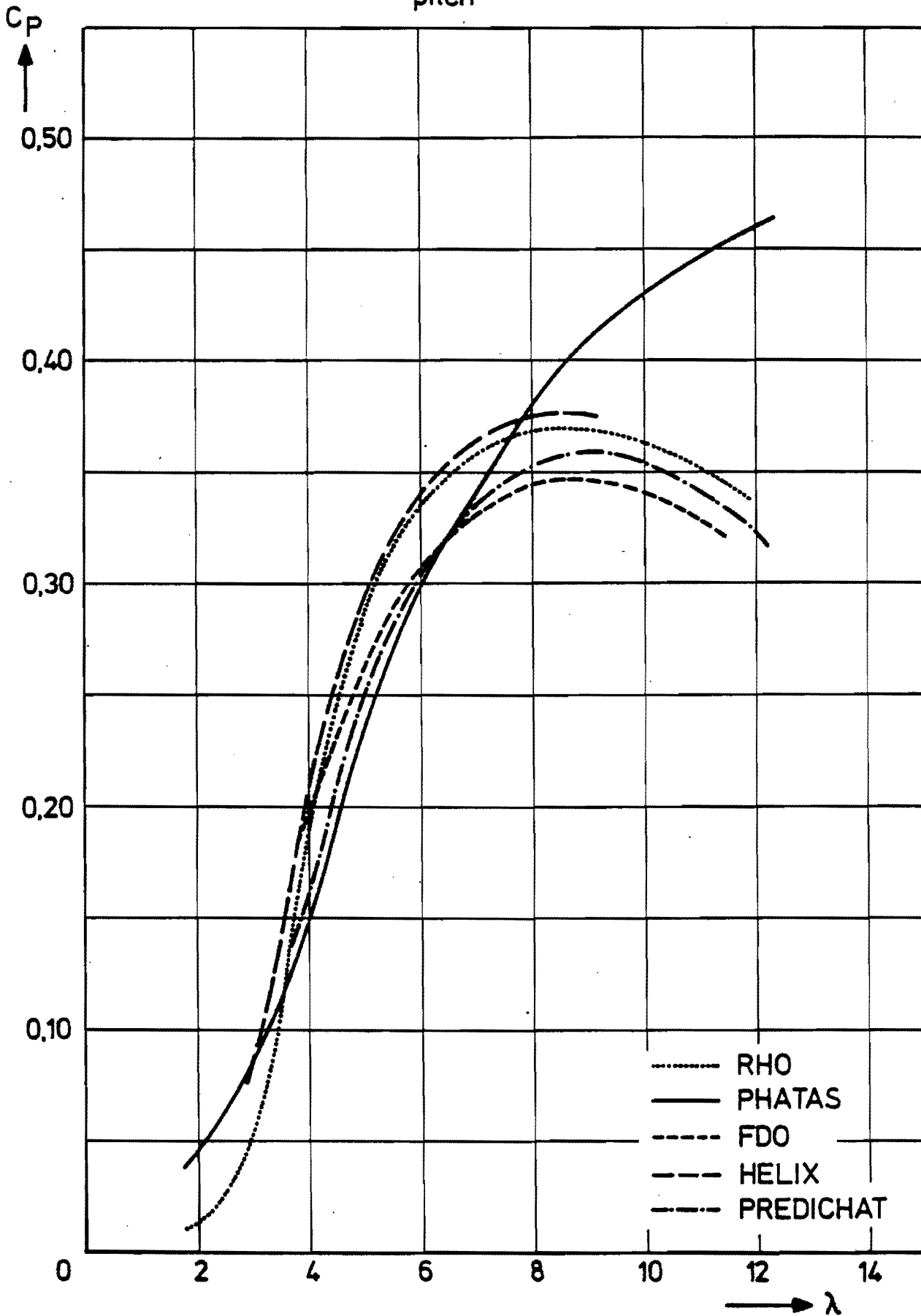


Fig. 6: Berekende C_p - λ krommes bij een positieve pitchverstelling $\theta_{pitch} = 5^\circ$ voor de rotor van tabel 1.

NLR/PETTEN configuratie
 $\theta_{pitch} = 5^\circ$

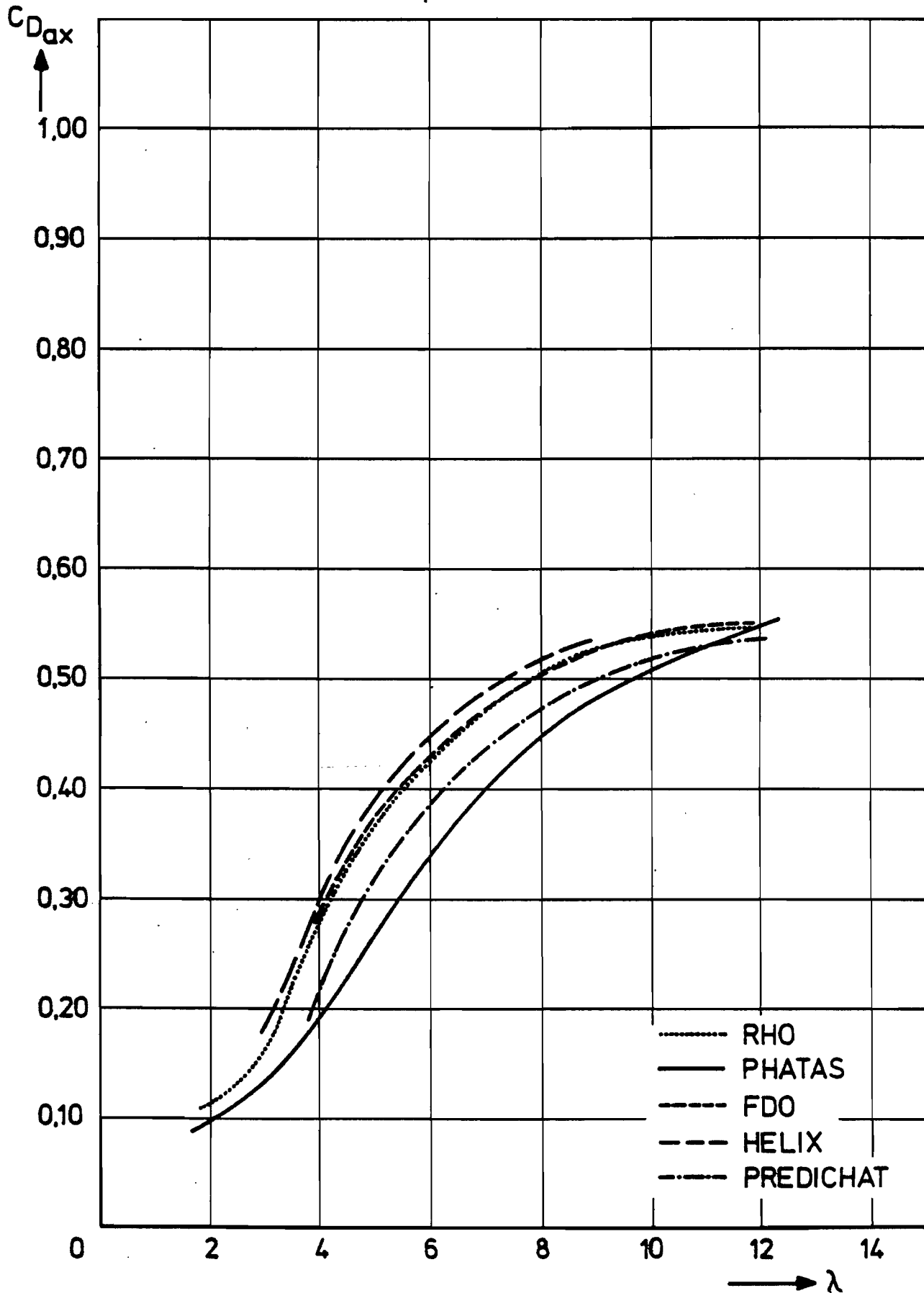


Fig. 7: Berekende $C_{D_{ax}}$ - λ krommes bij een positieve pitchverstelling $\theta_{pitch} = 5^\circ$ voor de rotor van tabel 1.

NLR/PETTEN configuratie
 $\theta_{pitch} = 10^\circ$

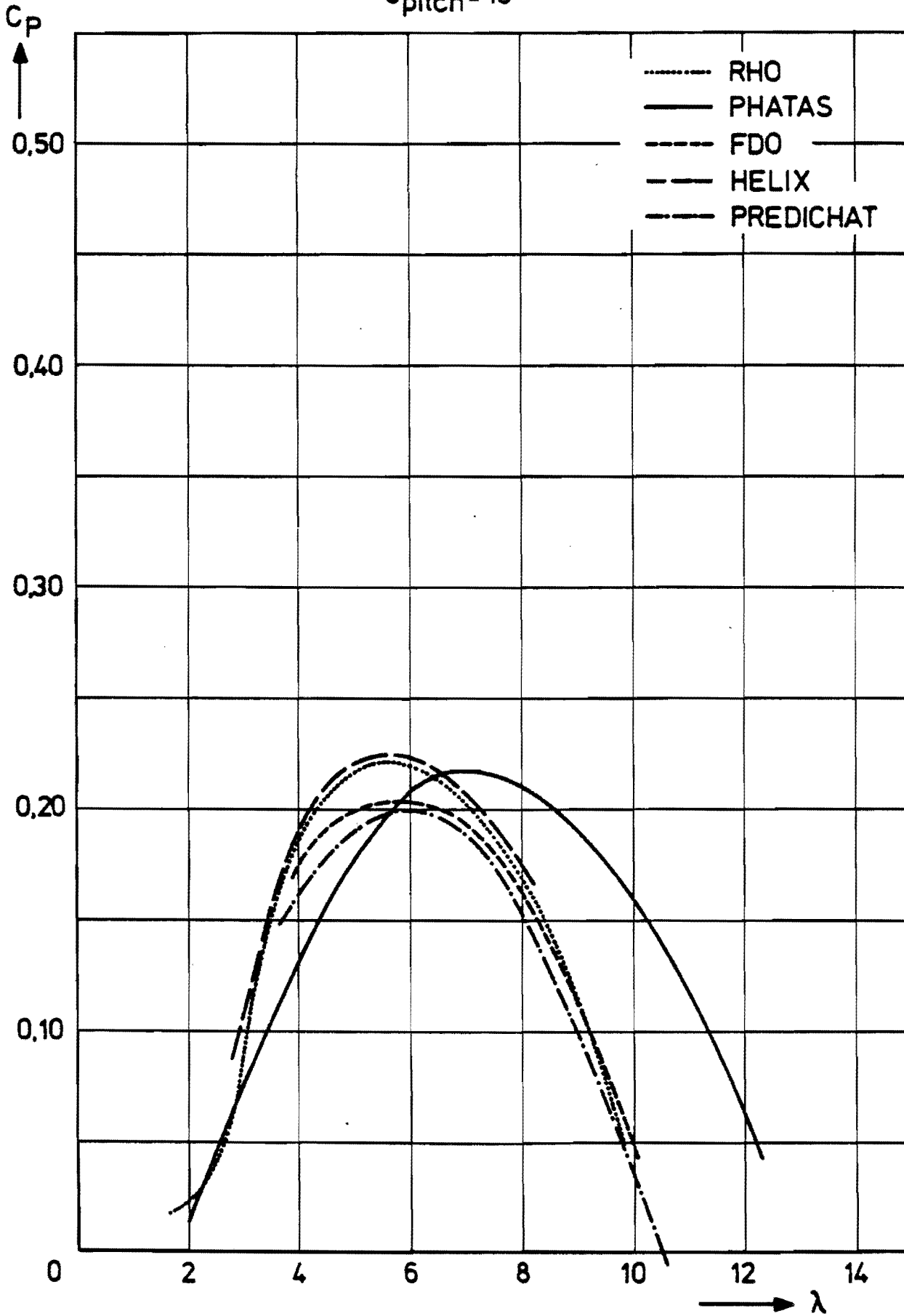


Fig. 8: Berekende C_p - λ krommes voor de rotor van tabel 1 met een positieve pitchverstelling $\theta_{pitch} = 10^\circ$.

NLR/PETTEN configuratie
 $\theta_{pitch} = 10^\circ$

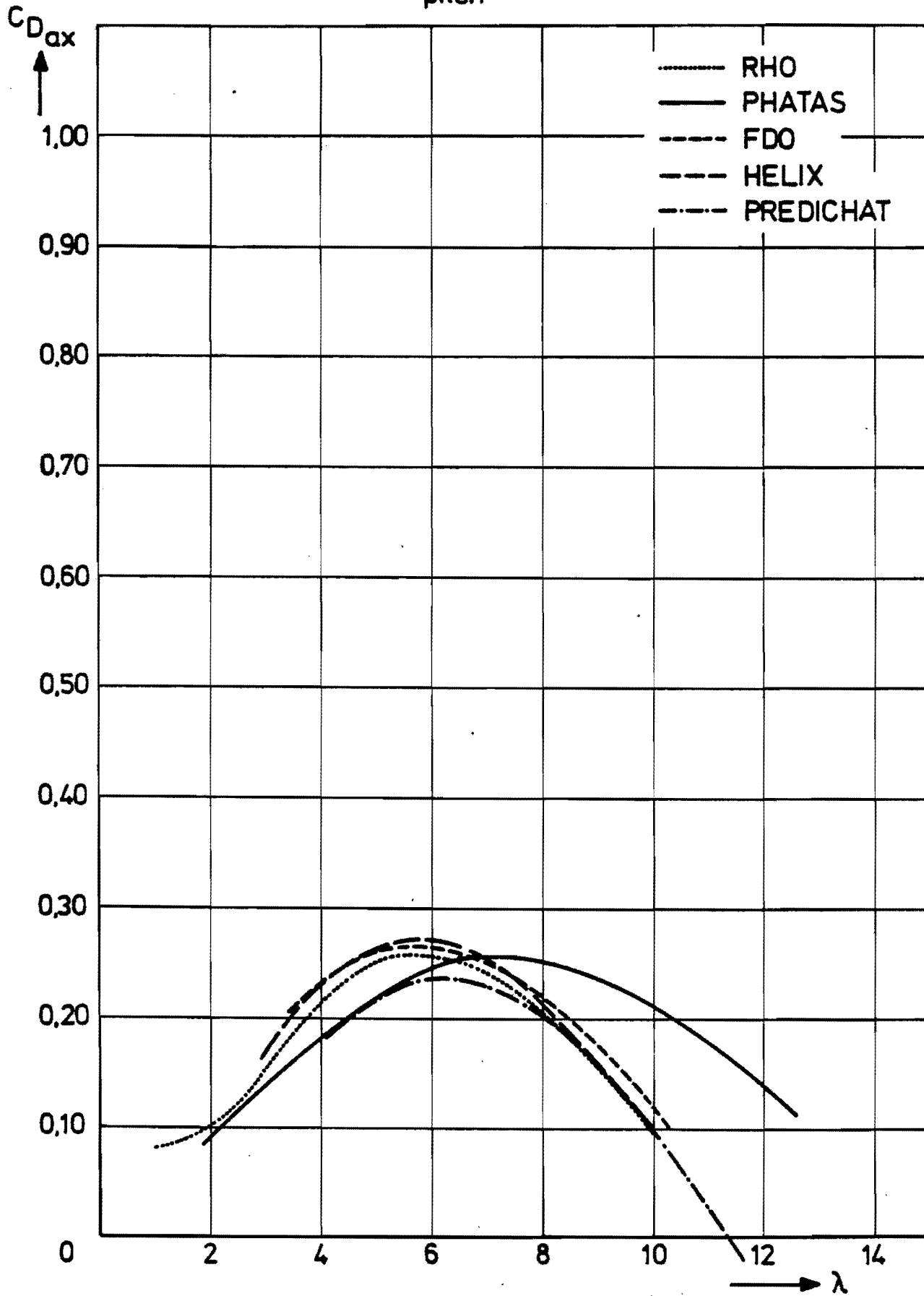


Fig. 9: Berekende $C_{D_{ax}}$ - λ krommes voor de rotor van tabel 1 met een positieve pitchverstelling $\theta_{pitch} = 10^\circ$.

NLR/PETTEN configuratie
 $\theta_{pitch} = 0^\circ$ $C_d = 0$

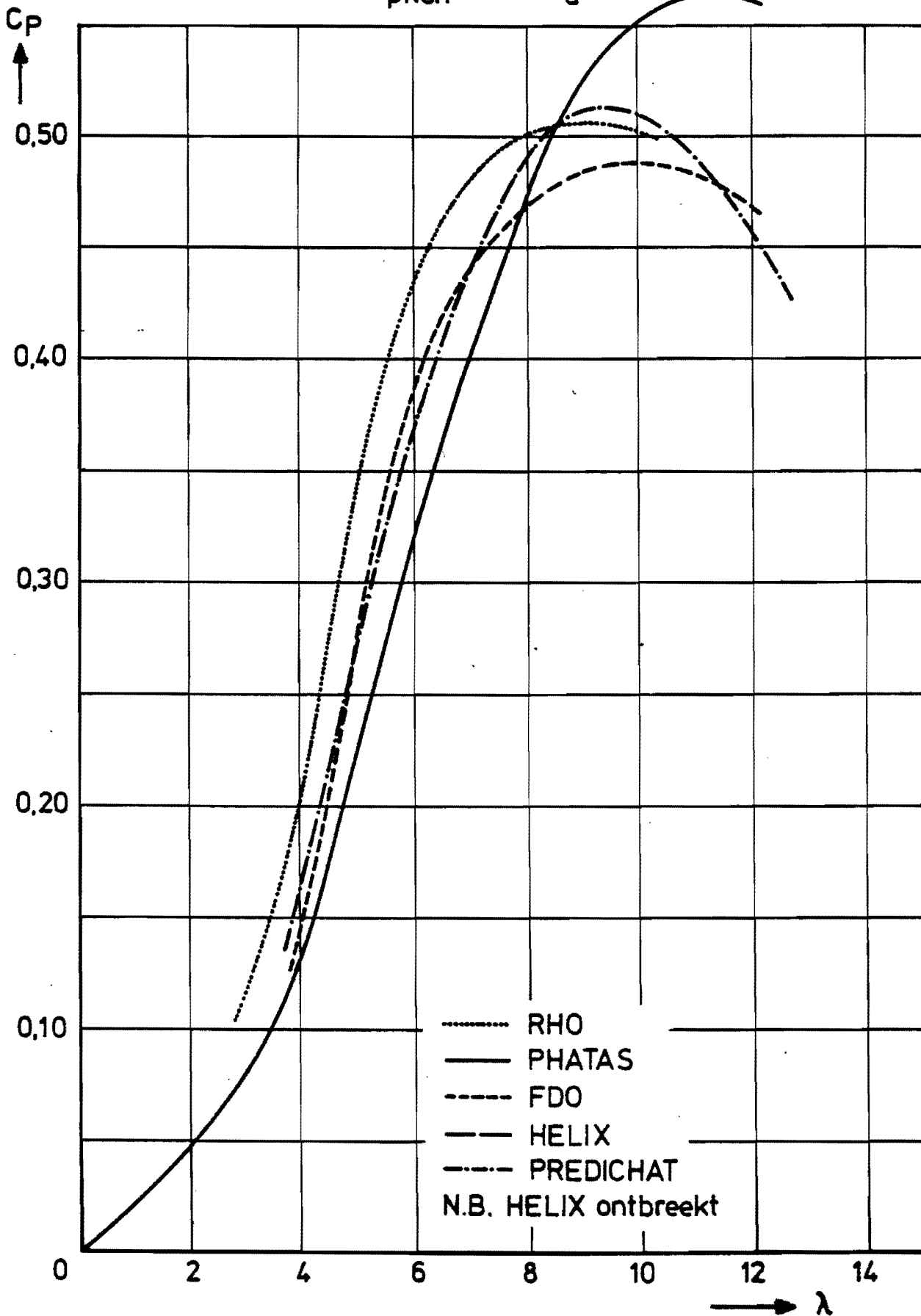


Fig. 10: Berekende C_p - λ krommes voor de rotor van tabel 1 (met $\theta_{pitch} = 0^\circ$) in de "niet-viskeuze" situatie. Verkregen door in tabel 2 overall $C_d = 0$ te nemen.

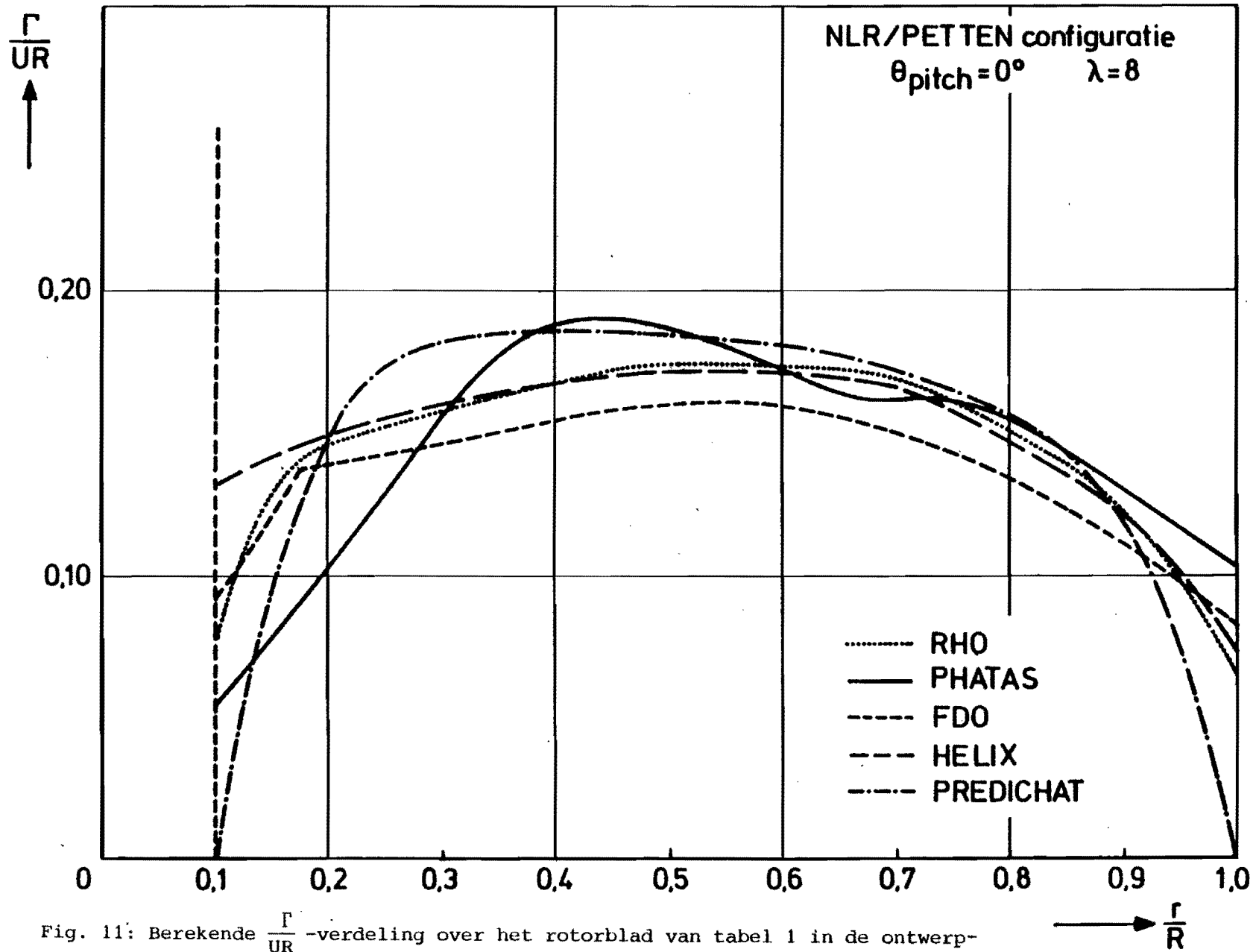


Fig. 11: Berekende $\frac{\Gamma}{UR}$ -verdeling over het rotorblad van tabel 1 in de ontwerp-situatie ($\lambda = 8$, $\theta_{pitch} = 0$).

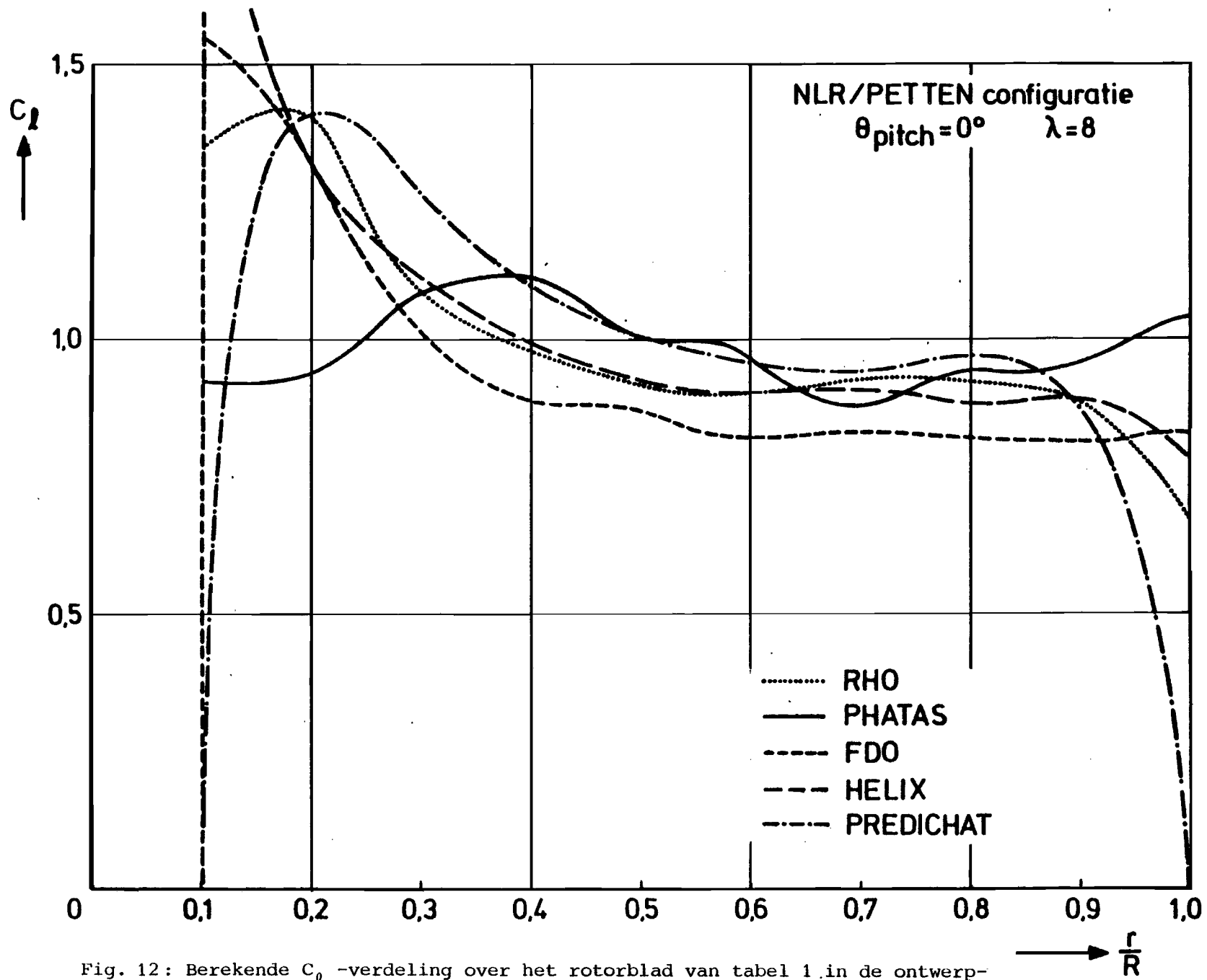


Fig. 12: Berekende C_l -verdeling over het rotorblad van tabel 1 in de ontwerp-situatie ($\lambda = 8$, $\theta_{pitch} = 0$)

NLR/PETTEN configuratie
 $\theta_{pitch} = 0^\circ$ • metingen 1983

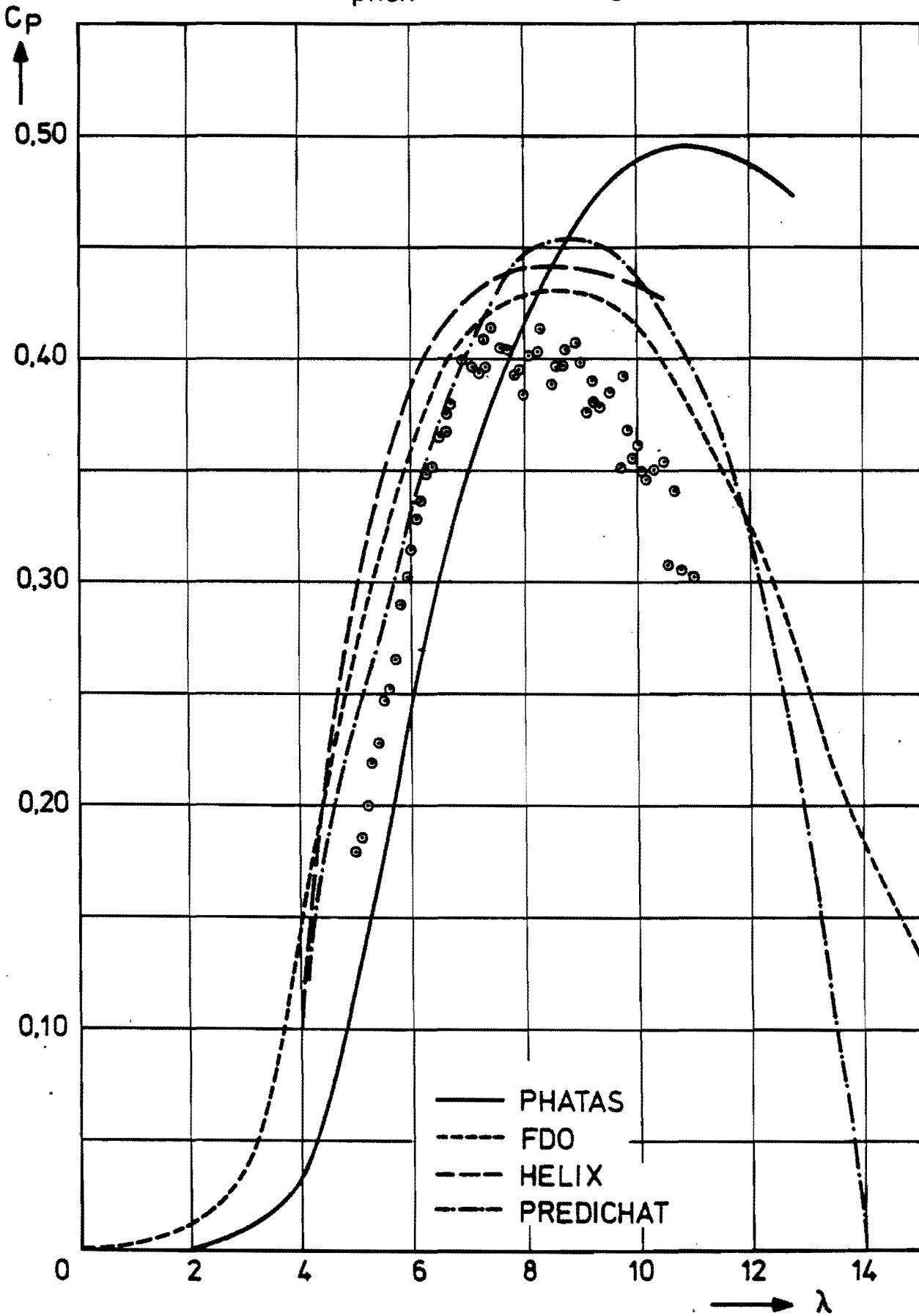


Fig. 13: Vergelijking van de berekende C_p - λ krommen met metingen bij $\theta_{pitch} = 0^\circ$.

NLR/PETTEN configuratie
 $\theta_{pitch} = 0^\circ$ • metingen 1983

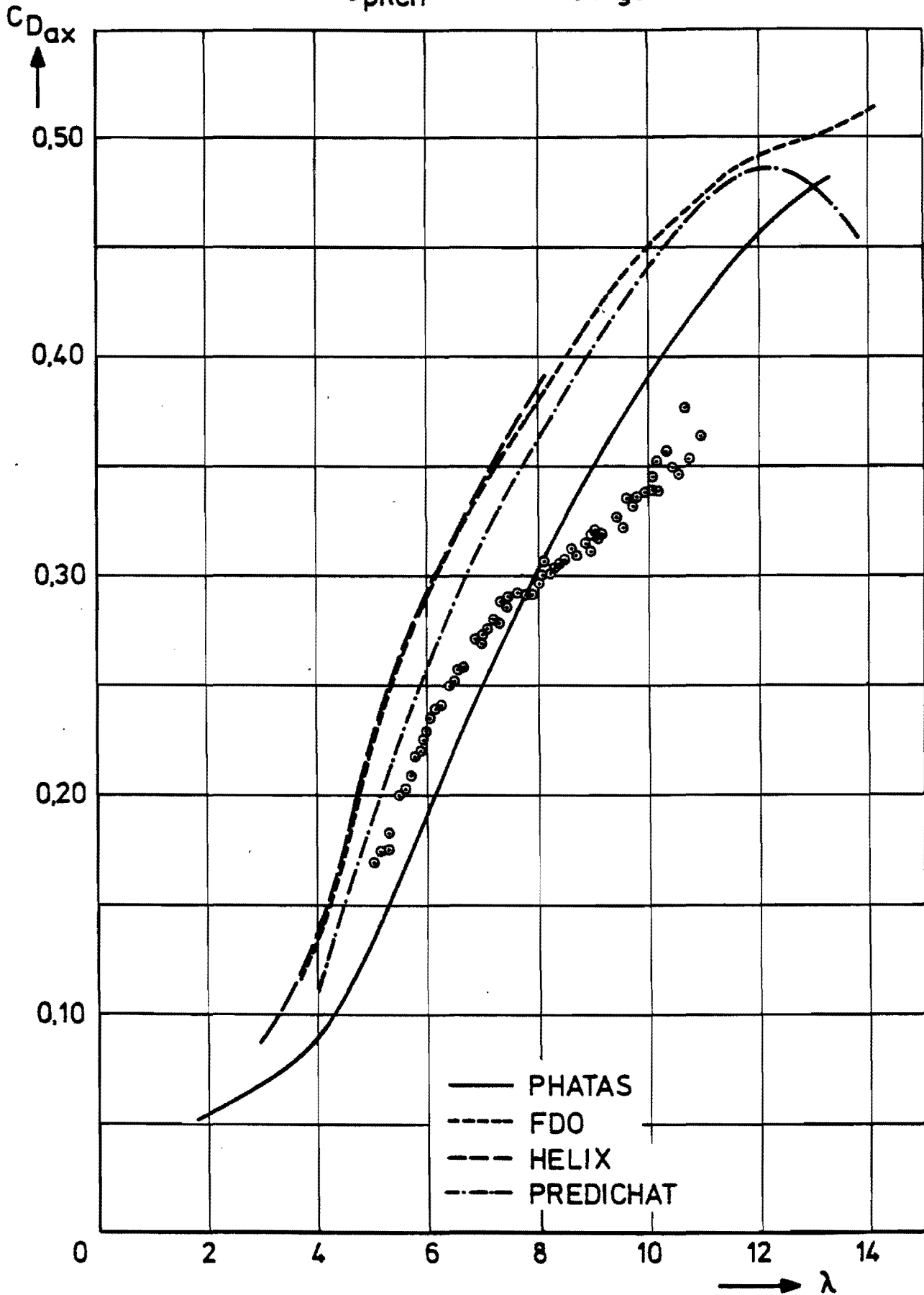


Fig. 14: Vergelijking van de berekende $C_{D_{ax}}-\lambda$ krommen met metingen bij $\theta_{pitch} = 0^\circ$.

NEWIN-WORKSHOP: rotor-aerodynamika van horizontale as windturbines

Geachte deelnemer,

Hierbij bevestigen wij uw deelname aan de bovengenoemde NEWIN-workshop. Het programma zoals vermeld in de uitnodiging heeft geen wijzigingen ondergaan, en ziet er als volgt uit:

Plaats: TH-Delft, Instituut voor Windenergie, Kluyverweg 1,
2629 HS Delft, tel. 015-785170.

Datum: dinsdag 16 april 1985

uur:

09.30 aankomst en koffie
10.00 G.A.M. van Kuik, THE: de herziening van de axiale impulstheorie
10.30 diskussie
11.00 koffiepauze
11.15 J.N.T. Jehee, ECN: de opzet van, en ervaringen met het blad-
elementen programma PHATAS
11.45 diskussie
12.15 lunch
13.00 G.J.W. van Bussel, THD: de asymptotische dragende lijnmethode
13.30 diskussie
14.00 O. de Vries, NLR: de 'free wake', dragende lijnmethode HELIX
14.30 diskussie
15.00 theepauze
15.15 vergelijking van de diverse methodes en samenvattende diskussies
16.00 einde

Het Instituut voor Windenergie is gehuisvest in het gebouw Vliegtuigbouw-
kunde van de afdeling der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek.

De workshop vindt plaats in zaal F van dit gebouw. Deze zaal bevindt zich
op de 5e verdieping. Ook toiletten en garderobe zijn op deze verdieping
aanwezig.

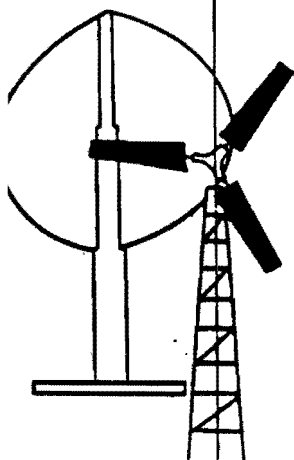
Op de bijgevoegde wegwijzer is het gebouw gemarkeerd met het nummer 71.
Vanaf de rijksweg A-13 Rotterdam-'s Gravenhage kan men het best de afslag
Delft-zuid nemen, waarna de aanduiding T.H.-wijk gevolgd wordt. Op de T-
splijting met de Schoemakerstraat slaat men links af, en de verdere
route volgt vanzelf met de "wegwijzer". Bij het gebouw is voldoende
parkeergelegenheid.

Vanaf het station Delft-zuid is het gebouw op circa 10 minuten loop-
afstand gelegen. Route via Kruithuisweg en Rotterdamseweg, zie de
"wegwijzer".

We verzoeken u om vooral op tijd aanwezig te zijn. De toegang tot de
zaal bevindt zich aan de zijde van de spreker!

De lunch vindt plaats in de lunchkamer van het gebouw, op de 1e ver-
dieping.

ewin
EDERLANDSE
INDENERGIE
ERENIGING



BIJLAGE II

Deelnemerslijst NEWIN Workshop op 16 april 1985

1. ir. F. van 't Hulle	ECN
2. ir. J.N.T. Jehee	ECN
3. dr. J. Dragt	ECN
4. ir. G.A.M. van Kuik	THE
5. ir. P.T. Smulders	THE
6. ir. J. Piers	NLR
7. ir. J. van Egmond	NLR
8. ing. O. de Vries	NLR (NOP)
9. ir. H. Hutting	KEMA
10. dr.ir. Th. van Holten	FDO
11. ir. B. Orbons	DHV Amersfoort
12. dr. E. Dick	RU Gent
13. dr. F. Haers	RU Gent
14. K. Pallet	VU Brussel
15. ir. J. van Briel	Univ. Antwerpen
16. ir. J. Grift	TWEB
17. ir. W. Kuik	Stentec
18. M. Goossens	Univ. Antwerpen
19. dr.ir. W. van Gent	Marin
20. prof.dr.ir. A.J. Hermans	THD
21. ir. A. Bruining	IvW
22. ir. L.J. Vermeer	IvW
23. drs. G.J.W. van Bussel	IvW
24. ing. J.L. Kooman	IvW
25. drs. F. Hagg	FDO

Nagekomen gecorrigeerde PHATAS berekeningen

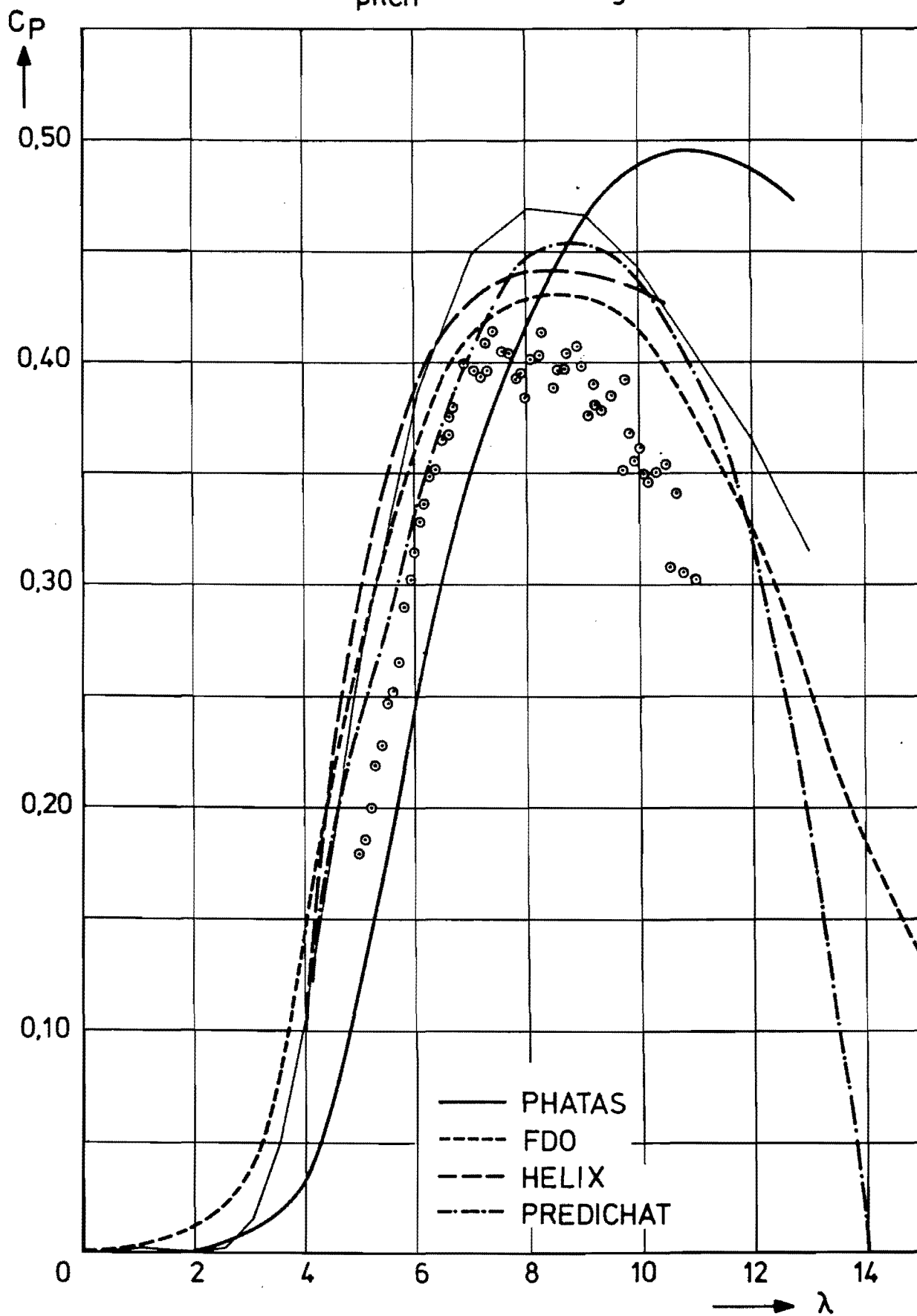
Op de valreep, vlak voor de verspreiding van het rapport met het verslag van de NEWIN-workshop "Rotoraerodynamica van horizontale-as windturbines", kwam het ECN met een set gecorrigeerde PHATAS berekeningen. Tijdens de workshop was het vermoeden al gerezen, dat er sprake was van programmeerfouten, of fouten in de invoergegevens. Dat laatste blijkt het geval te zijn geweest.

Eén van de vele invoergegevens van PHATAS is de diameter van de toren van de turbine. Voor een goed vergelijk met de overige methoden, die geen rekening houden met toren-invloed, moest deze op nul worden gesteld (geen toren). Per abuis is echter met een dubbele torendiameter gerekend (ca. 4,5 meter), met als gevolg vreemde rekenresultaten. Deze nieuwe informatie leidt strikt genomen niet tot wijziging van het rapport. Dat is immers niet meer dan een uitgebreid verslag van de dag waarop ook de foute PHATAS berekeningen zijn gepresenteerd.

Toch leek het gewenst de deelnemers op de hoogte te stellen van de oorzaak van de vreemde resultaten. Tevens leek het verstandig de juiste resultaten, zoals ze gepresenteerd hadden moeten worden, ook aan de workshopdeelnemers te verstrekken. Daarom zijn hierbij een zestal figuren gevoegd, met daarin de nieuwe PHATAS rekenresultaten. Ze betreffen de $C_p - \lambda$ en de $C_{D_{ax}} - \lambda$ krommes voor een pitchverstelhoek van 0° , $+5^\circ$, en $+10^\circ$. Het blijkt nu dat PHATAS als aerodynamische berekeningsmethode resultaten genereert die sterk overeenstemmen met die van de NLR-methode RHO. Dit is niet zo vreemd, de methoden zelf komen namelijk nogal sterk overeen.

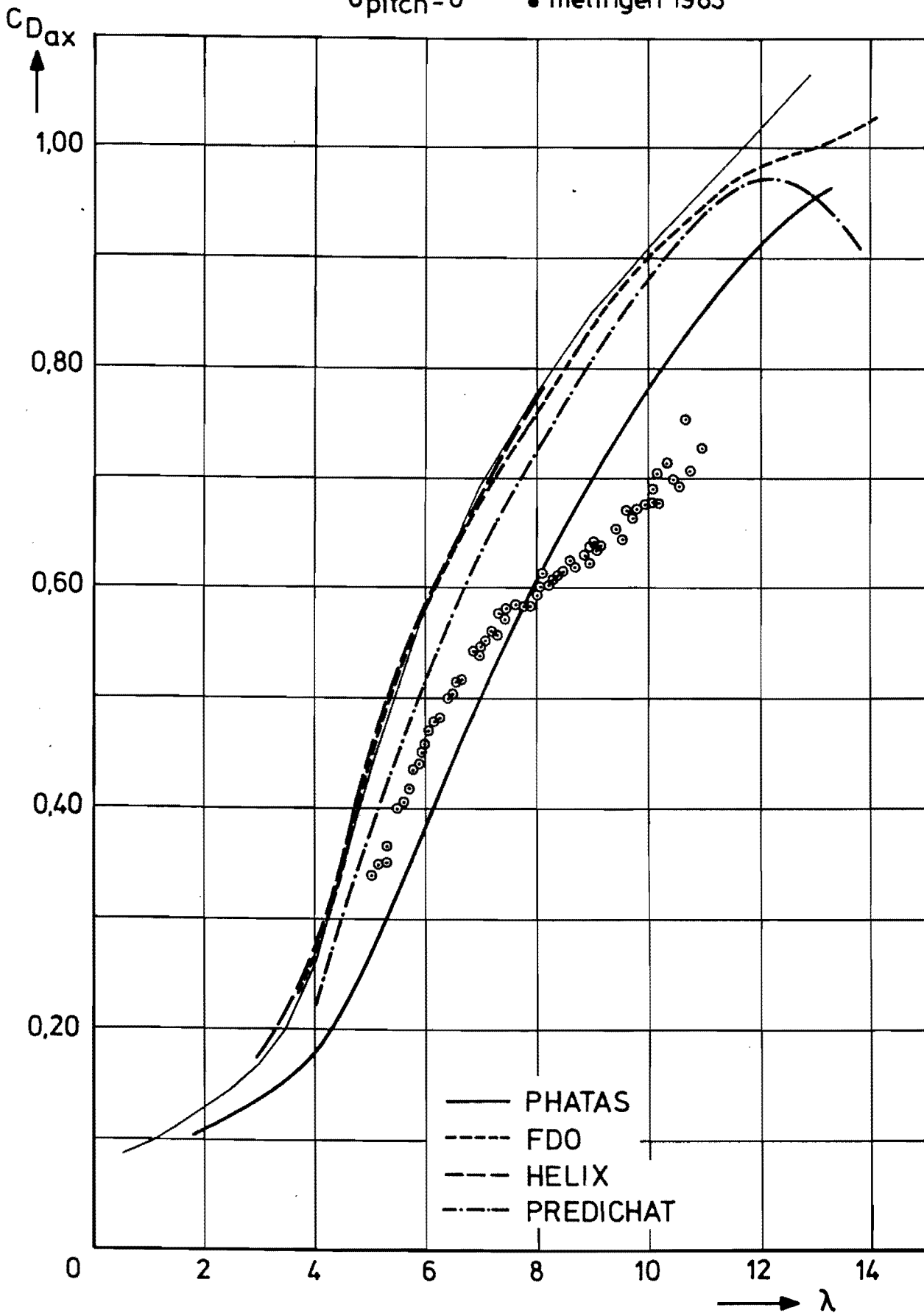
De conclusies uit de workshop zouden daarom ook weinig anders zijn geworden, indien het ECN wel correcte PHATAS resultaten zou hebben getoond. Op veel plaatsen waar in het verslag gesproken wordt van "RHO", had in dat geval "RHO en PHATAS" gestaan, en uiteraard waren er geen opmerkingen geweest over het sterk afwijkend gedrag van "PHATAS".

NLR/PETTEN configuratie
 $\theta_{pitch} = 0^\circ$ \circ metingen 1983



Toegevoegd: gecorrigeerde PHATAS berekeningen (dunne getrokken lijn).

NLR/PETTEN configuratie
 $\theta_{pitch}=0^\circ$ • metingen 1983



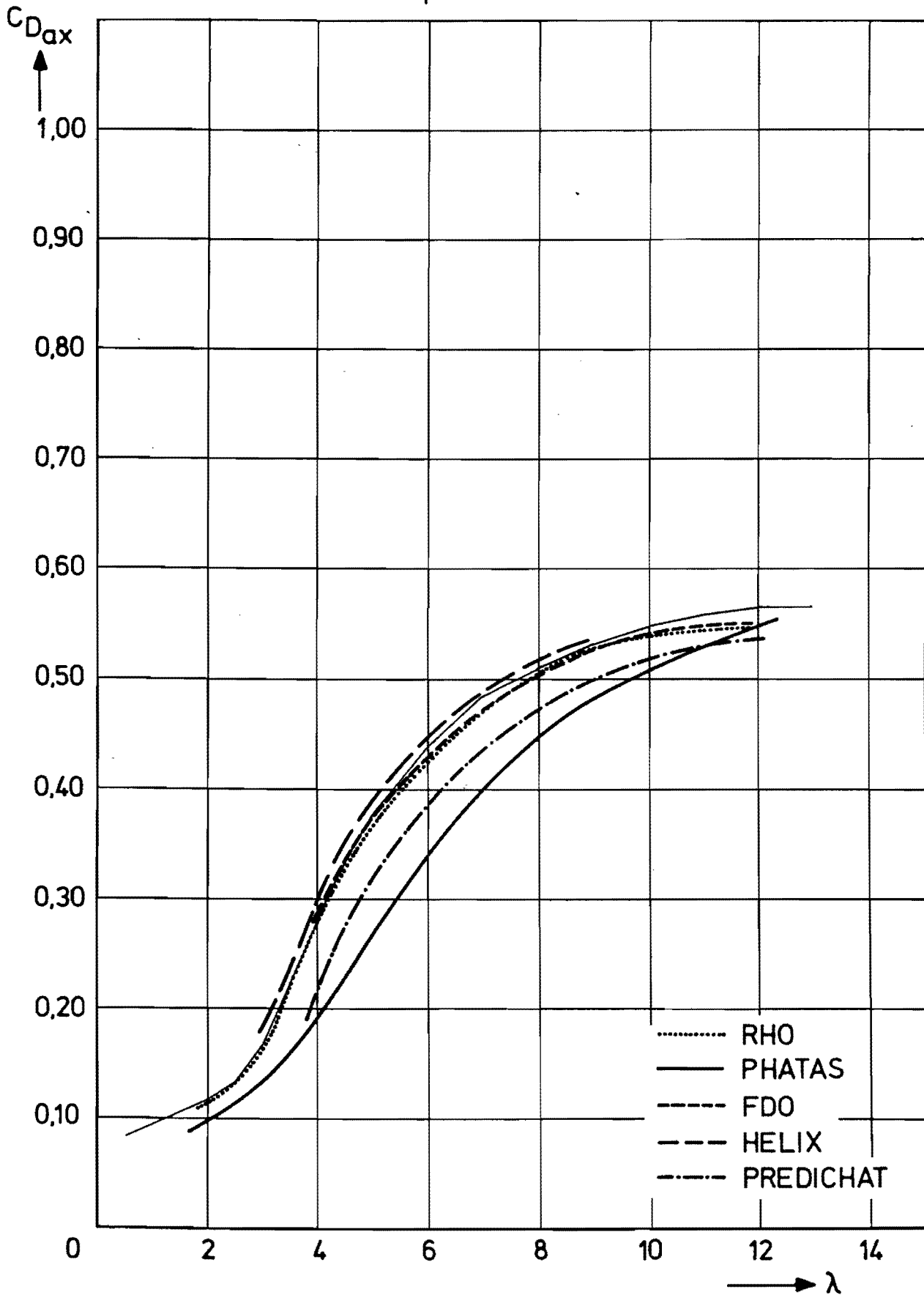
Toegevoegd: gecorrigeerde PHATAS berekeningen (dunne getrokken lijn).

NLR/PETTEN configuratie
 $\theta_{pitch} = 5^\circ$



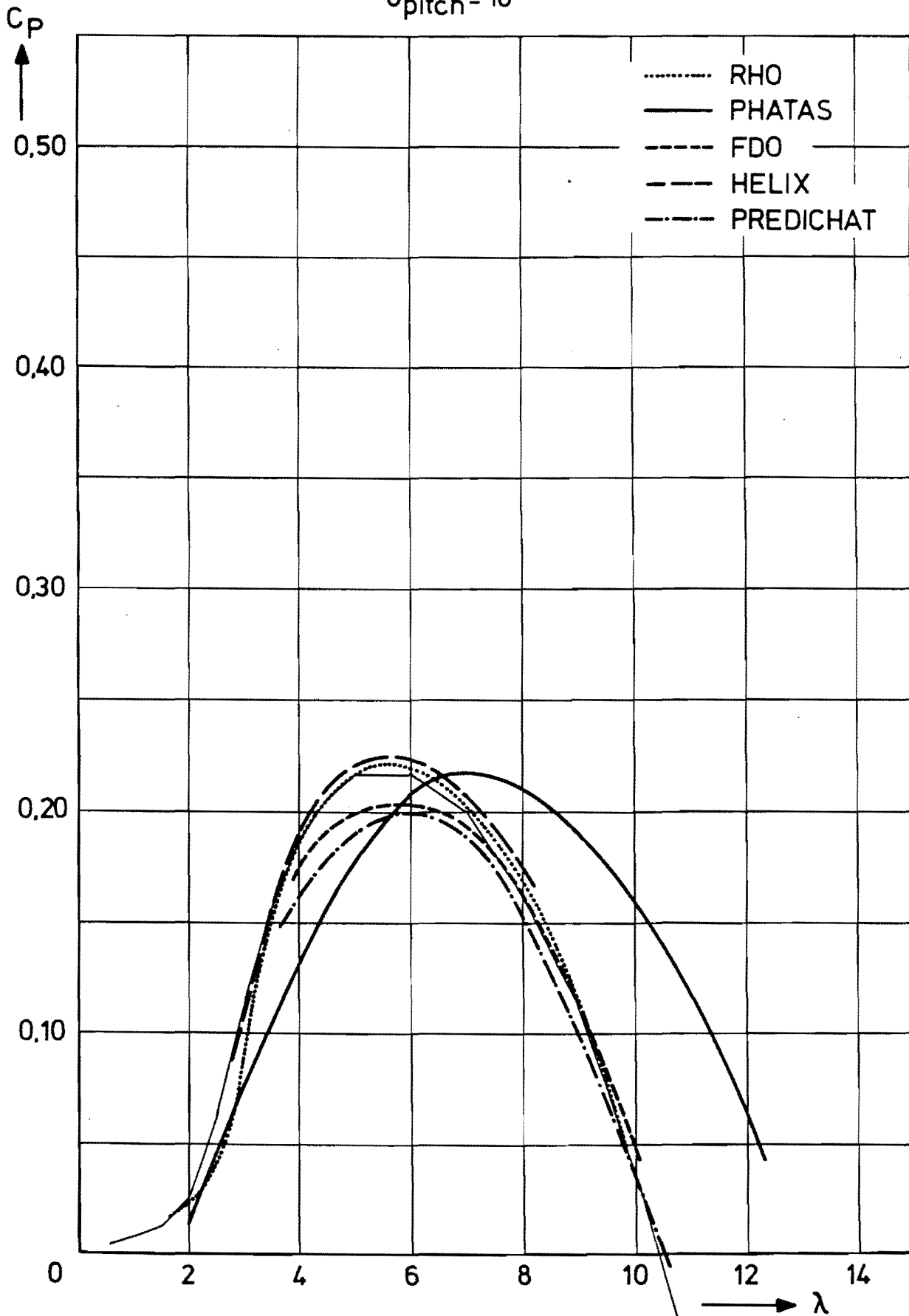
Toegevoegd: gecorrigeerde PHATAS berekeningen (dunne getrokken lijn).

NLR/PETTEN configuratie
 $\theta_{pitch} = 5^\circ$



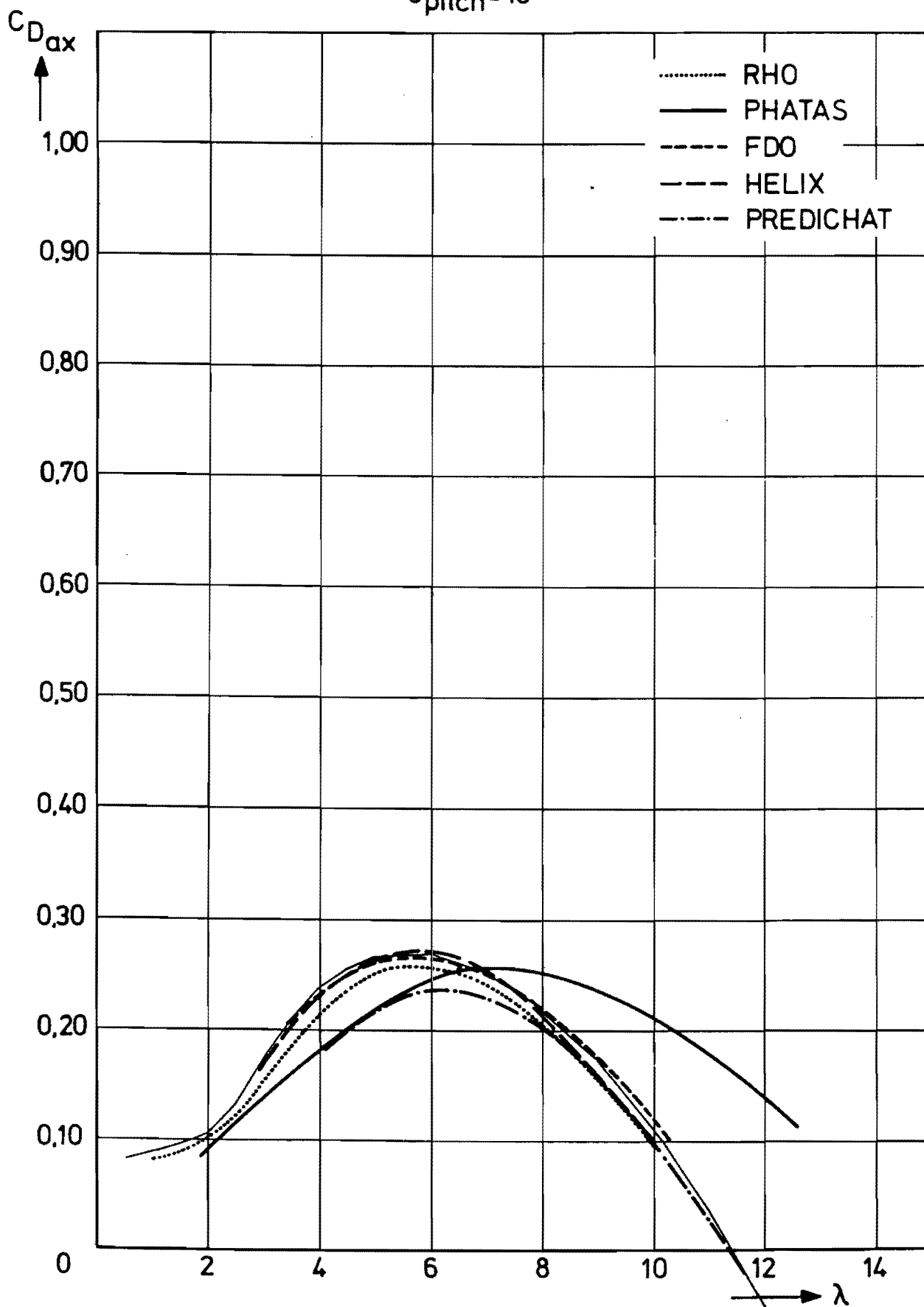
Toegevoegd: gecorrigeerde PHATAS berekeningen (dunne getrokken lijn).

NLR/PETTEN configuratie
 $\theta_{pitch} = 10^\circ$



Toegevoegd: gecorrigeerde PHATAS berekeningen (dunne getrokken lijn).

NLR/PETTEN configuratie
 $\theta_{pitch} = 10^\circ$



Toegevoegd: gecorrigeerde PHATAS berekeningen (dunne getrokken lijn).