

Terug naar Jaipur

Joris Willems

Vijftig jaar geleden maakte ik een ambitieuze fietstocht door het noordwesten van het Indische subcontinent. De tempels, forten en moskeeën, de drukte van de markten en bazaars, ze liggen me nog allemaal vers in het geheugen.



De kleine Samrat Yantra van Jaipur met ondergetekende (1993)

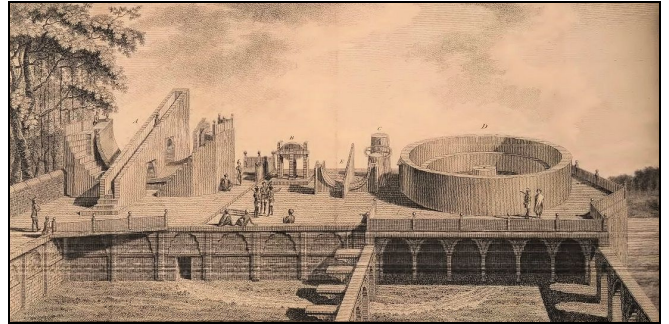
Ik dwaalde langsheen de heilige rivieren en de oude sterrenwachten van Jaipur en Delhi. Deze 300 jaar oude observatoria werden gebouwd door de toenmalige Maharadja van Amber, Jai Singh II en zijn een must voor iedere bezoeker aan Rajasthan. Nieuwsgierig kocht ik enkele boeken met de nodige uitleg. De werkjes hebben al die jaren, prominent maar onaangeroerd, op mijn boekenplank gestaan. Het voltooien van de basiscursus zonnwijzerkunde leek me de ideale gelegenheid om de boeken van onder het stof te halen.



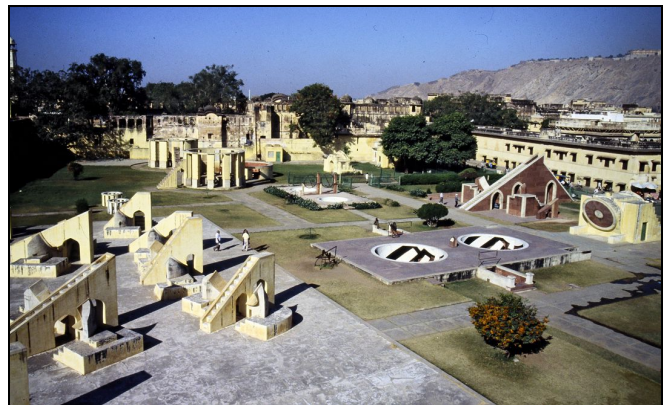
Maharadja Swai Jai Singh II (1688-1743). Bron [1]

De observatoria van Maharadja Swai Jai Singh II
Jai Singh was naast maharadja ook wetenschapper. Aan het hof in Jaipur ontving hij niet alleen hindoe- en

moslimgeleerden, maar ook westerlingen, met wie hij zich onderhield over astronomie en astrologie. Hij bouwde vijf sterrenwachten in openlucht, die hij uitrustte met bakstenen en marmeren instrumenten [2]. De resultaten van zijn waarnemingen werden gebundeld in de astronomische tafels, de "Zij-i Muhammed Shahi", die de maharadja opdroeg aan de toenmalige mogolkeizer.

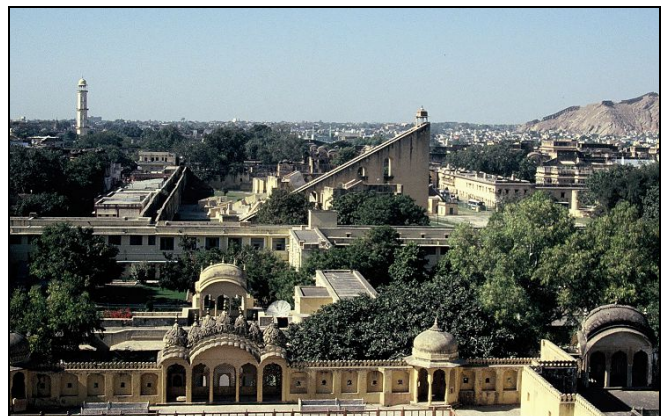


Het observatorium van Varanasi [3]



Het observatorium van Jaipur (1993)

In dit artikel wil ik graag de Samrat Yantra, de "koning der instrumenten", toelichten. Het toestel is in elke sterrenwacht prominent aanwezig en is in feite niets anders dan een reusachtige equatoriale zonnwijzer.



Zicht op Jaipur en de grote Samrat Yantra (1993)

De Samrat Yantra

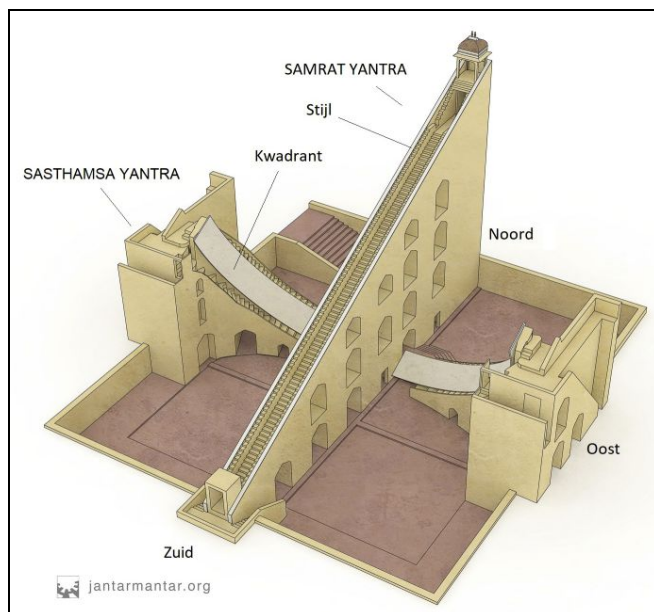
De Samrat Yantra bestaat uit een grote gemetselde rechthoekige driehoek, opgesteld in het meridiaanvlak, waarvan de schuine zijde naar de hemelpool wijst en als stijl dienst doet. De poolstijl is overlangs gesplitst in twee delen, die gescheiden worden door een trap. Aan elke zijde van de schaduwgever bevindt zich een cirkelkwadrant, loodrecht op de bovenvermelde driehoek en evenwijdig aan het evenaarsvlak. De middelpunten van de denkbeeldige cirkels door de kwadranten liggen respectievelijk op de oostelijke en westelijke rand van de stijl. De toestellen, die opvallen door hun enorme afmetingen, laten toe de lokale equatoriale coördinaten, zijnde de uurhoek (t) en de declinatie (δ) van een hemellichaam te bepalen.

Zowel de kwadranten als de stijl zijn bekleed met marmer en voorzien van gegraveerde schaalverdelingen. De cijfers worden weergegeven in het Devanagari-schrift. Er zijn trappen voorzien om het aflezen te vergemakkelijken.

१	२	३	४	५	६	७	८	९	०
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0

Cijfers in Devanagari-schrift

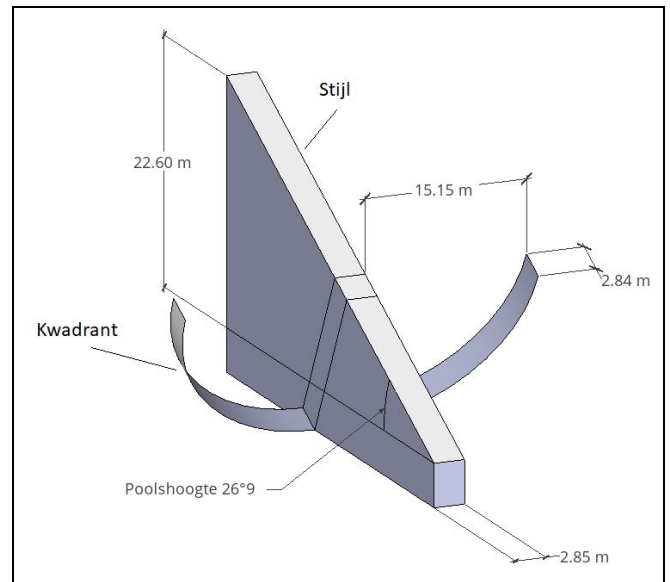
De afmetingen van de zes nog bestaande zonnewijzers staan in bijgaande tabel. In Jaipur en Varanasi zijn er telkens twee versies aanwezig, een kleine (K) en een grote (G), die respectievelijk de Laghu Samrat Yantra en de Brihat Samrat Yantra worden genoemd.



De Brihat Samrat Yantra van Jaipur. Bron [5]

Plaats	φ	Hoogte stijl	Basis stijl	Hypotenusa stijl	Straal kwadrant	Breedte kwadrant	Breedte stijl
Delhi	28°37'	20,73 m	34,59 m	39,2 m	15,09 m	2,32 m	3,20 m
Jaipur K	27°30'	6,9 m	13,22 m	14,73 m	2,78 m	0,98 m	1,29 m
Jaipur G	26°53'	22,6 m	44,6 m	50,1 m	15,15 m	2,84 m	2,9 m
Varansi K	25°19'	2,53 m	3,06 m	3,39 m	0,97 m	0,52 m	0,28 m
Varanasi G	25°14'	6,80 m	10,92 m	12,9 m	2,79 m	1,76 m	1,39 m
Ujjain	23°10'	6,7 m	14,66 m	16 m	2,78 m	0,96 m	1,51 m

Tabel: De afmetingen van de zonnewijzers van Maharadja Jai Singh. Bron [4]



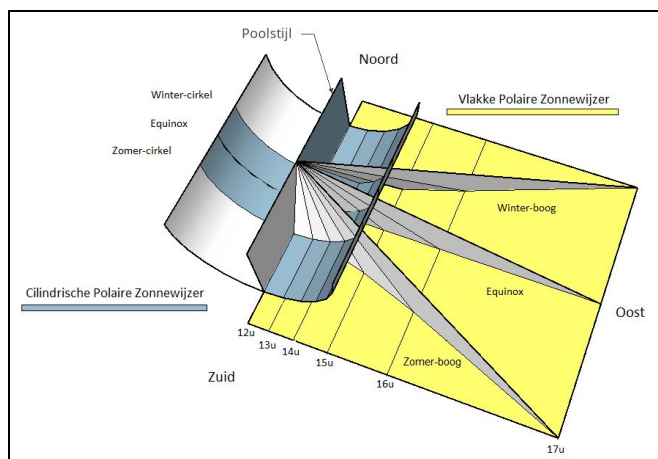
De basisafmetingen van de Brihat Samrat Yantra van Jaipur

De Samrat Yantra als zonnewijzer

Herleid tot zijn eenvoudigste vorm kan de Samrat Yantra beschouwd worden als een cilindrische polaire zonnewijzer, zeg maar een polaire zonnewijzer met een tot halve cilinder opgekrulde wijzerplaat.

De stijl, die samenvalt met de as van de cilinder, verdeelt de halve cilinder in twee gelijke kwadranten. Zoals de naam aangeeft is de stijl naar de noordelijke hemelpool gericht.

De uur- en declinatielijnen van een cilindrische polaire zonnewijzer beperken zich tot rechten en cirkels. Bij de vlakke uitvoering is het iets ingewikkelder. De uurlijnen liggen op ongelijke afstand van elkaar en de declinatielijnen zijn, met uitzondering van de equinoxlijn, hyperbolen.



De vlakke en de cilindrische polaire zonnewijzer

De uurlijnen

De uurlijnen lopen evenwijdig aan de stijl en verdelen elk kwadrant in zes gelijke intervallen van 15°. De tijd kan zowel op de boven- als onderrand van het kwadrant worden afgelezen. Er wordt een westerse dan wel een hindoe-tijdsindeling met "ghatikas" en "palas" gebruikt.

Westerse tijdsindeling	Hindoe tijdsindeling	Hindoe tijdsindeling	Westerse hoekindeling	Hindoe hoekindeling
24 uur	60 ghatikas		360°	
6 uur	15 ghatikas		90°	90 amsas
24 min	1 ghatika	60 palas	6°	6 amsas
4 min	10 palas		1°	1 amsa = 60 kalas
24 sec	1 pala	60 vipalas		

Conversietabel voor tijd en hoeken

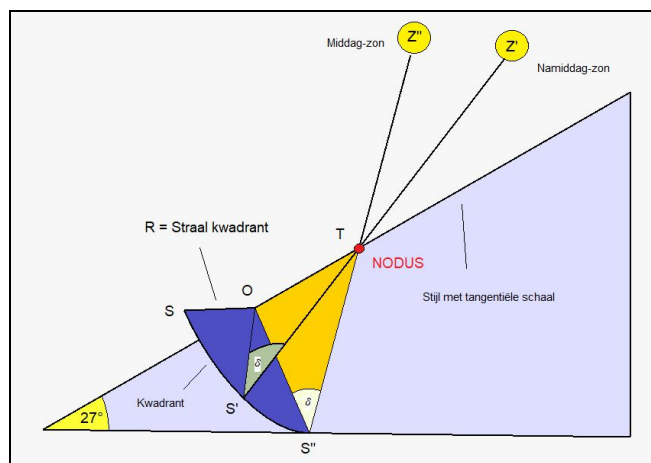
De declinatielijnen

Wanneer we bij een cilindrische polaire zonnewijzer gebruikmaken van een vaste nodus, bekomen we evenwijdige declinatiecirkels die loodrecht op de uurlijnen staan. In het geval van de grote Samrat Yantra van Jaipur moet de wijzerplaat ongeveer 13 meter breed zijn om alle declinatiecirkels van de zon (van -23,44° tot +23,44°) te kunnen afbeelden [6]. De kwadranten van Jai Singh's zonnewijzers zijn dus veel te smal.

De maharadja heeft dit probleem opgelost door te kiezen voor een instelbare nodus. Op de rand van de stijl is een tangentiële schaal aangebracht die voldoet aan de vergelijking:

$$OT = R \cdot \tan(\delta)$$

(zie figuur rechtsboven).



Principe van de tangentiële schaal

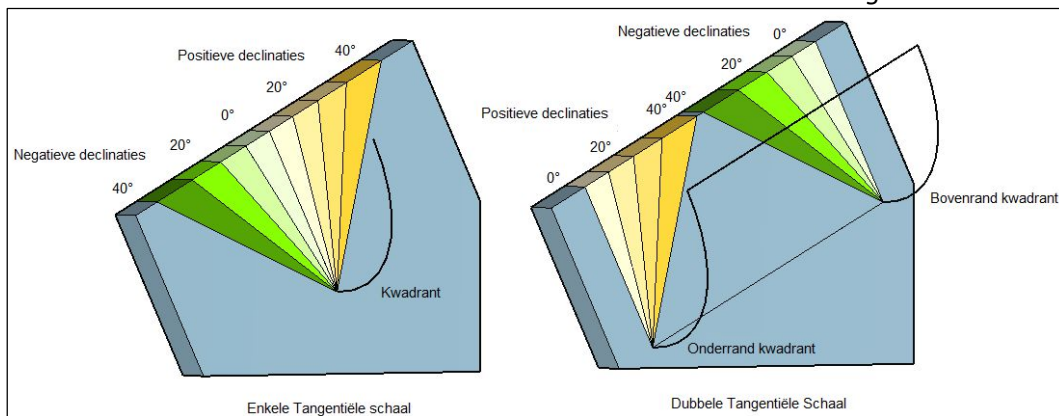
De afstand OT is een eenduidige maat voor de declinatie. In de zonnewijzerkunde wordt de declinatie (δ), en dus ook OT, verondersteld constant te blijven gedurende de loop van een dag. De straal van het kwadrant is gelijk aan $R = SO = S'O = S''O$ en de hoeken $\text{TÔS} = \text{TÔS}' = \text{TÔS}''$ zijn rechte hoeken. Hieruit volgt dat de driehoeken ΔSOT , $\Delta\text{S}'\text{OT}$ en $\Delta\text{S}''\text{OT}$, voor de dag in kwestie, congruente driehoeken zijn.

De nodus in T wordt zodanig ingesteld dat zijn schaduw (S, S' en S'') perfect op de rand van het kwadrant valt. Op het ogenblik van de equinox, wanneer de declinatie 0° is, vallen O en T samen.

Tot daar het principe. In werkelijkheid zijn er twee tangentiële schalen, elk met hun eigen nulpunt, naargelang de declinatie positief of negatief is. Beide schalen overlappen elkaar gedeeltelijk. Bij een noordelijke declinatie wordt gebruikgemaakt van de onderrand van het kwadrant en in het geval van een zuidelijke declinatie van de bovenrand.

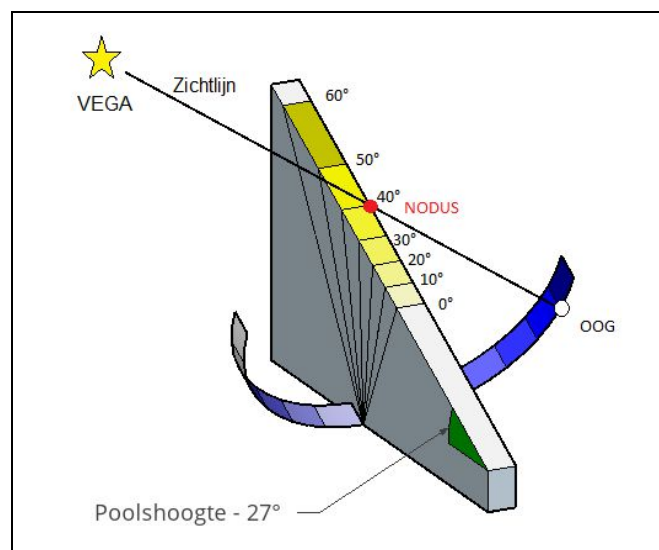
In de praktijk kan de nodus (bijv. een staaf) vanop de trap, die midden op de stijl naar boven loopt, worden ingesteld en afgelezen. Eens de nodus juist is geplaatst, zal de schaduw heel de dag mooi langs de rand van het kwadrant lopen.

De enkele en de dubbele tangentiële schaal



Nachtelijke waarnemingen

Het gebruik van de Samrat Yantra is niet beperkt tot de zon. Vandaar dat de tangentiële schaal doorloopt van ongeveer + 60° tot - 60°. 's Nachts kan een waarnemer de nodige observaties doen, van maan, sterren of planeten, door zijn oog vlak naast de rand van het juiste kwadrant te houden en een assistent de nodus zodanig te laten positioneren dat het oog van de waarnemer, de nodus en het geobserveerde hemellichaam perfect gelijnd zijn. Onderstaande tekening illustreert dit voor de ster Vega die een declinatie van ongeveer 39° N heeft.



Een nachtelijke waarneming van een ster met een noordelijke declinatie

Nauwkeurigheid

Snelheid van de schaduw

Jai Singh streefde een maximum aan nauwkeurigheid na door zijn instrumenten zo groot mogelijk te maken. We kunnen de booglengtes van de respectievelijke kwadranten berekenen met behulp van:

$$\text{booglengte} = \pi R / 2$$

waarbij R de straal van het kwadrant is.

Als we weten dat de schaduw 6 uur nodig heeft om de 90° van een kwadrant te doorlopen, is het een klein kunstje om de snelheid van de schaduw te berekenen.

Tabel: De snelheid van de schaduw en de kleinste tijdsindeling

	R (meter)	Booglengte (meter)	Snelheid (meter/uur)	Snelheid cm/ minuut	Snelheid mm/sec	Kleinste Tijdsindeling (sec)
Delhi	15,09	23,70	3,95	6,58	1,1	2
Jaipur K	2,78	4,37	0,73	1,21	0,2	20
Jaipur G	15,15	23,80	3,97	6,61	1,1	2
Varanasi K	0,97	1,52	0,25	0,42	0,1	60
Varanasi G	2,79	4,38	0,73	1,22	0,2	15
Ujjain	2,78	4,37	0,73	1,21	0,2	20

Zeker bij de twee grootste Samrats, die van Jaipur en Delhi, is de verplaatsing van de schaduw, met een snelheid van 1 mm/sec, daadwerkelijk waar te nemen. Of de Samrat Yantra's effectief de nauwkeurigheid halen waarvoor ze ontworpen zijn, is een vraag open voor discussie.

Penumbra

De afmetingen van de instrumenten hebben één groot nadeel. De respectabele afstand tussen de stijl en de wijzerplaat veroorzaakt een niet te verwaarlozen halfschaduw of penumbra. Wanneer de zon in het vlak van de equator staat, kunnen we, uitgaande van een zonsdiameter van 32 boogminuten (0,5333°), de breedte van de halfschaduw berekenen met:

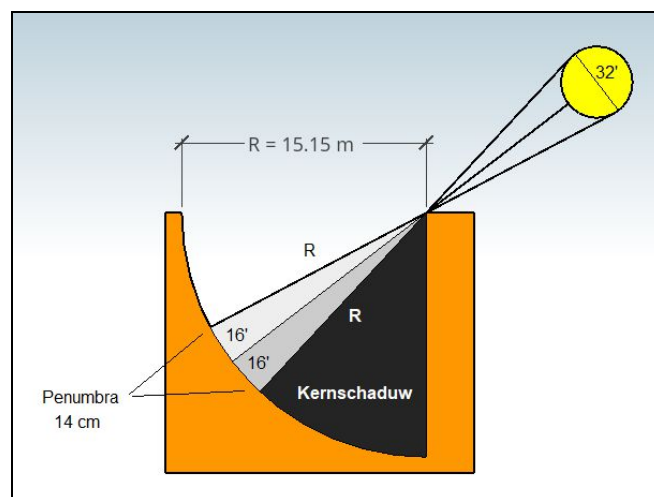
$$\text{breedte penumbra} = 0,5333^\circ \cdot 2\pi R / 360^\circ$$

waarbij R de straal van het kwadrant is. Voor de verschillende zonnwijzers vinden we:

	Straal kwadrant (meter)	Breedte halfschaduw (centimeter)
Delhi	15,09	14,0
Jaipur K	2,78	2,6
Jaipur G	15,15	14,1
Varanasi K	0,97	0,9
Varanasi G	2,79	2,6
Ujjain	2,78	2,6

Tabel: De breedte van de halfschaduw

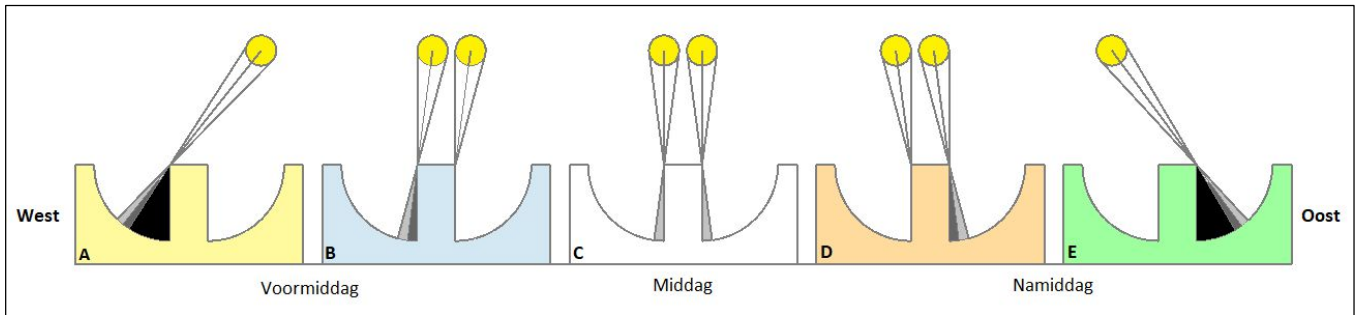
Het juiste uur wordt theoretisch afgelezen halverwege de halfschaduw.



De breedte van de penumbra [7]

De middagspleet

De trap die de poolstijl overlans verdeelt geeft aanleiding tot een deftige middagspleet. Voor de grote zonnwijzers van Jaipur en Delhi spreken we algauw over 3 meter.



Schaduw-overgang rond het middaguur

Bovenstaande figuur geeft schematisch de schaduwovergang weer van het westelijk naar het oostelijk kwadrant. We veronderstellen de zon in het vlak van de equator ($\delta = 0^\circ$). In de voormiddag daalt de kernschaduw, afgelijnd met dunne halfschaduw, langsheen het westelijk kwadrant tot de schaduw de schaduwgever nadert (A). In B staat de westelijke rand van de zon pal boven de stijl. Er is enkel een halfschaduw te zien op het westelijke kwadrant. De kernschaduw is verdwenen. Wanneer het middelpunt van de zon exact boven de stijl (C) staat, wordt de halfschaduw verdeeld over de beide kwadranten. Er is geen kernschaduw. Die verschijnt pas op het oostelijk kwadrant wanneer de oostelijke rand ver genoeg is doorgeschoven (E). De schaduwen klimmen langsheen het oostelijk kwadrant tot omstreeks 18 u, wanneer de volledige zonnwijzer in de schaduw verdwijnt.

Sasthamsa Yantra (Donkere kamer)

De grote Samrat Yantra van Jaipur wordt langs beide zijden geflankeerd door de Sasthamsa Yantra's, twee smalle hoge bouwsels [8]. Binnenin bevindt zich een donkere kamer met daarin telkens twee meridiaancirkels van 60° , sextanten genaamd.

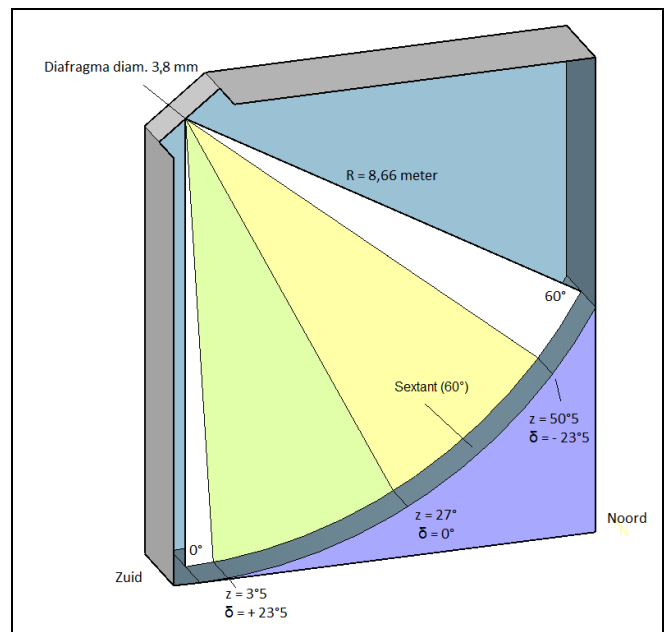


De westelijke Sasthamsa Yantra van Jaipur (1993)

De sextanten hebben een straal van 8,66 meter. De werking is te vergelijken met een camera obscura of gaatjescamera. Omstreeks de ware middag valt er door een klein gaatje in het plafond in het middelpunt van de genoemde cirkels, een fijne zonnestraal. Die werpt een lichtvlek ter grootte van een tennisbal op de meridiaancirkels.

Het diafragma heeft een diameter van 3,8 mm. De grootte van het diafragma bepaalt de scherpte van de lichtvlek op de sextanten. Omdat de opening een zekere afmeting heeft, zijn de beeldpunten van de zon geen puntjes, maar kleine cirkeltjes, verstrooiingscirkeltjes genaamd. Hoe kleiner het diafragma, hoe kleiner de cirkeltjes en hoe scherper het beeld. Maar wanneer het diafragma te klein wordt treedt er diffractie op, een vorm van straalafbuiging, die het beeld dan weer onscherp maakt. De grootte van het diafragma is dus een afweging.

De Sasthamsa Yantra's laten toe de declinatie, de zenitafstand en de diameter van de zon bij meridiaandoorgang te bepalen. Met wat geluk kan men ook zonnevlekken waarnemen. Op onderstaande figuur zijn de zenitafstanden voor de equinox en de zonnewendes weergegeven.



De Sasthamsa Yantra van Jaipur

Zenitafstand (z), declinatie (δ) en breedtegraad (φ) staan met elkaar in verband door de formule:

$$z = \varphi - \delta$$

Eenvoudigheidshalve hebben we in de figuur φ afgerond naar 27° en de maximale absolute waarde van δ gelijkgesteld aan $23,5^\circ$.

Jai Singh, die op de hoogte was van de geschriften van Ulugh Beg, heeft zich ongetwijfeld laten inspireren door de grote sextant van Samarkand [9].

Zonnetijd versus kloktijd

Tot slot nog een kleine noot voor diegene die de Samrat-tijd wil vergelijken met zijn uurwerk. In heel India hanteert men "Indian Standard Time" (IST), die overeenkomt met UT + 5.30 uur. Zomertijd wordt niet gebruikt. De lengtecorrectie wordt gegeven in onderstaande tabel. Voor de tijdsvereffening verwijzen we naar de jaarlijkse tabel in Zon & Tijd [10].

Plaats	Lengtegraad (d°m's")	Lengtegraad (dd)	Lengte in tijd (uu:mm:ss)
Delhi	77°13'05" Oost	77,22500° Oost	05:08:54
Jaipur	75°49'19" Oost	75,82194° Oost	05:03:17
Varanasi	83°00'46" Oost	83,01277° Oost	05:32:03
Ujjain	75°46'03" Oost	75,77167° Oost	05:03:05

Tabel: De lengtecorrectie

Stel dat we op 29 juni 2019, tijdens een bezoek aan het observatorium van Jaipur, willen weten hoe laat de zon pal in het zuiden staat:

LAT	12:00:00	Ware zonnetijd (Local Apparent Time)
- E	00:03:26	Tijdsvereffening
LMT	12:03:26	Lokale middelbare tijd
- Lon	05:03:17	Lengtecorrectie (zie bovenstaande tabel)
UT	07:00:09	Universele tijd te Greenwich
- X	05:30:00	Verskil tussen UT en IST
IST	12:30:09	Indian Standard Time

Besluit

Jai Singh wordt weleens meewarig een "middeleeuwse astronoom in de achttiende eeuw" genoemd, die de aansluiting met de Copernicaanse revolutie had gemist. Het is een raadsel waarom een man die zich liet omringen door wetenschappers die bekend waren met telescopen, de noniusschaal en de werken van Kepler, halsstarrig bleef vasthouden aan

methoden die dateerden uit de Middeleeuwen en de Renaissance.

Hoe dan ook, voor de zonnwijzerliefhebber zijn de toestellen, met hun spel van lijnen en curven, een streling voor het oog. Het observatorium van Jaipur werd onlangs door de UNESCO erkend als werelderfgoed.

Geraadpleegde literatuur

- Barker, S. (1777). An Account of the Bramin's Observatory at Benares. Philosophical Transactions of the Royal Society of London
- Garrett, A., & Guleri, C. (1907). Das Jaypur-Observatorium und sein Erbauer. Das Weltall
- Kaye, G. (1918). The Astronomical Observatories of Jai Singh. Calcutta
- Sharma, V. N. (1995). Sawai Jai Singh and his Astronomy. Delhi
- Volwahren, A. (2001). Cosmic Architecture in India. Munich

Noten & referenties

1. collections.vam.ac.uk/item/O433404/raja-jai-singh-ii-of-drawing-unknown/
2. Delhi, Jaipur, Varanasi, Ujjain en Mathura. Het observatorium van Mathura heeft de tand des tijds niet doorstaan. Varanasi is ook gekend onder de namen Benares en Kashi
3. Zie Barker, 1777
4. Zie Kaye, 1918 en Sharma, 1995. Het gaat om de gemeten waarden van de basisdriehoek. Wie de cijfers narekent met de stelling van Pythagoras of driehoeksmetkunde zal afwijkende resultaten vinden
5. www.jantarmantar.org > Renderings from 3D models > The Samrat Yantra
6. De breedte van de wijzerplaat van de grote zonnwijzer in Jaipur had minstens $2R \cdot \tan(23,44^\circ) = 13,14$ m moeten zijn
7. De hoeken zijn in de tekening buiten proportie weergegeven
8. De Sasthamsa Yantra van Delhi is van binnen vervallen tot een ruïne
9. Lyssens, J., Het observatorium van Oeloeg Beg, Zonnetijdingen 2004-2 (nr. 30), p. 15-16
10. Voor 2019: Zon & Tijd 2018.3, p. 37-38