

Een laatmiddeleeuws instrument voor gelijke uren Het Zutphense kwadrant (deel 2)

In *Zonnetijdingen* nr. 68 meldde wij u de vondst van een 14de eeuwse kwadrant in de Nederlandse stad Zutphen. Het hiernavolgende artikel werd geschreven door dr. John Davis naar aanleiding van zijn lezing op de vergadering van de *British Sundial Society* in Newbury (GB) op 21 september 2013. De oorspronkelijke Engelstalige versie verscheen in het *BSS-Bulletin* van maart 2014. Het eerste deel van de Nederlandstalige vertaling verscheen in *Zonnetijdingen* nr. 70 (juni 2014). Het tweede deel ervan volgt hieronder. De nummering van de illustraties en de referenties loopt dus door. Hier past ook een woord van dank aan dr. John Davis voor zijn toestemming om deze vertaling in ons tijdschrift te publiceren.

Het Zutphense kwadrant meetkundig bekeken

Aangezien er enkel traditionele euclidische meetkunde, een liniaal, een passer en een graveernaald aan te pas kwam, is het interessant om even stil te staan bij de wijze waarop dit kwadrant werd getekend, evenals bij de informatie die daarvoor was vereist.

Het is interessant om even stil te staan bij de wijze waarop dit kwadrant getekend moet zijn, waaraan alleen traditionele euclidische meetkunde, een liniaal, een passer en een graveernaald te pas kwamen, en welke informatie daar verder voor nodig was. Een voorbeeld van het ontwerp van een kwadrant voor gelijke uren is te vinden in het manuscript Bodleian MS Ashmole 19 (f. 54)¹⁶.

De eerste stap was de constructie van de gradenboog. Zodra de begrenzendende kwartcirkel met een passer was getrokken, kon men vanuit het snijpunt van deze boog met de linker- en rechterzijde van het kwadrant, met dezelfde passeropening, twee andere bogen trekken. De snijpunten van deze twee bogen met de kwartcirkel gaven de punten van 30° en 60°, terwijl het snijpunt van deze twee bogen onderling het punt van 45° gaf, dat het kwadrant middendoor deelt. Er bestaat geen meetkundige methode om een hoek (van 30° in dit geval, red.) in drie gelijke delen te verdelen, maar met enig proberen bereikte een ervaren tekenaar wel een aanvaardbaar resultaat. Deze stukken van 10° konden opnieuw worden verdeeld in twee gelijke delen van 5° en de verdere verdeling in stukken van 1° kon zowat op zicht. Opmerkelijk is dat de maker van het Zutphense kwadrant de kwartcirkel niet volledig onderverdeeld heeft, maar zich beperkt heeft tot 63° - de maximale zonshoogte op zijn breedtegraad.

De volgende stap was de rechterzijde van het kwadrant doormidden te delen om het middelpunt te bepalen van de halve cirkel die het middaguur aangeeft. Tot hier was de constructie universeel en vereiste ze geen verdere gegevens. Om de declinatiebogen te tekenen waren er verscheidene mogelijkheden. Een ervan was tabellen te raadplegen van de plaatselijke maximale zonshoogte op het tijdstip dat de zon intreedt in elk teken van de Dierenriem. De belangrijkste intredepunten zijn die van de Ram

en van de Weegschaal omdat ze de eveningspunten zijn. Deze zonshoogten werden opgezocht op de gradenboog. Vervolgens trok men een lijn vanuit het hoekpunt (de apex) van het kwadrant naar het punt van de bijbehorende zonshoogte. Het snijpunt van die lijn met de middagcirkel gaf de straal van de declinatieboog. Het was dan eenvoudig om een aantal bogen te graveren met het middelpunt in de apex en door de bijbehorende snijpunten.

Tot slot moesten de uurlijnen worden getekend. Daarvoor waren opnieuw tabellen nodig, in dit geval van de zonshoogte op drie specifieke tijdstippen: de twee eveningen, de zomerzonnenuwende en de winterzonnenuwende of de laatste datum waarop de zon zich op een bepaald uur nog net boven de horizon bevond. De maker ging er nu van uit dat de uurlijn een cirkelboog is door deze drie punten. Wiskundig is dat niet exact, zeker niet bij hogere breedtegraden¹⁷, maar de fouten zijn klein en die vereenvoudiging was eeuwenlang gebruikelijk bij instrumentmakers, tot computertechnologie beschikbaar kwam. Volgens de euclidische meetkunde gaat er door drie punten slechts één cirkel. Het middelpunt ervan vinden met passer en liniaal is een eenvoudig werkje. Als dat middelpunt was gevonden, kon men de cirkelboog trekken en was het kwadrant in feite klaar.

Om de gelijke-urenversie van een *quadrans vetus* te tekenen zijn tabellen nodig van de zonshoogte als functie van de datum voor elk gelijk uur. Deze zijn te vinden in de literatuur, maar ze zijn niet wijd verspreid. Er is een Engels voorbeeld van omstreeks 1400, opgesteld door Robert Stikford in de Sint-Albanusabdij¹⁸. Die tabel geldt voor slechts één breedtegraad. Het bestaan van oudere kwadranten bewijst dat er een eeuw eerder al zulke tabellen waren.

Nu we de constructievolgorde kennen is het mogelijk om, via zg. *reverse-engineering*, een aantal gegevens van het Zutphense kwadrant te vinden, met name: de breedtegraad waarvoor hij bedoeld was, de helling van de aardas die de opsteller van de zonshoogtetabellen gebruikte en de nauwkeurigheid van de instrumentmaker.

Eerst zoeken we de breedtegraad φ waarvoor het instrument ontworpen was. Dat kan op verschillende wijzen. De eenvoudigste, meest directe en vermoedelijk ook meest nauwkeurige gaat ervan uit dat, bij de eveningen, de zonshoogte op het middaguur (a_{nb}) eenvoudigweg gelijk is aan¹⁹

$$a_{nb} = 90^\circ - \varphi.$$

Nu trekken we, op een 'nauwkeurige'²⁰ foto van het kwadrant, een lijn vanuit de apex door het punt waar de declinatie lijn van de eveningen de middagcirkel kruist en verlengen deze tot aan de gradenboog. Daar kunnen we voor a_{nb} de waarde van $38,0^\circ$ aflezen. Dat betekent dat het instrument ontworpen was voor een breedte van $52,0^\circ$. Die breedtegraad is zowat die van Zutphen ($52,1^\circ$ N.B.). Een kleine fout op de gemeten waarde is mogelijk omdat het moeilijk is om exact te bepalen waar de apex precies ligt (die wordt verborgen door het oogje). Hetzelfde geldt voor het snijpunt van de equinoxboog met de middagcirkel. Het is dus onzeker of het kwadrant werkelijk was gemaakt voor de stad Zutphen zelf. Het is evenwel zeker dat het was gemaakt voor een plaats in het noordelijke deel van Europa en dat het alleszins bruikbaar was in Zutphen.

Een tweede methode om de breedtegraad van het instrument terug te vinden, is door uit te gaan van:

$$\varphi = 90^\circ - \frac{1}{2}(a_{ns} + a_{nw})$$

Hierin is a_{ns} , resp. a_{nw} , de zonshoogte op het middaguur tijdens de zomer-, resp. de winterzonnenevende. De waarden van $62,8^\circ$ en $14,0^\circ$ die werden gemeten op het kwadrant geven een breedtegraad van $51,6^\circ$ aan. Dat stemt redelijk overeen met de hierboven gevonden waarde. Ook hier is een kleine afwijking mogelijk door de gebruikte graveer- en meetmethode.

De parameters a_{ns} en a_{nw} komen ook terug in de formule

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(a_{ns} - a_{nw})$$

Hierin is ε de helling van de aardas. De waarde van $24,4^\circ$ die hieruit volgt is groter dan de 24° of $23\frac{1}{2}^\circ$ die we terugvinden in middeleeuwse manuscripten.

Hier moet opnieuw rekening worden gehouden met een kleine fout door zowel de meetmethode als de layout van het instrument. Het feit dat de schaal van de gradenboog slechts tot 63° loopt wijst er ook op dat het kwadrant bestemd was voor gebruik op 51° of 52° N.B. Het geeft ook aan dat het alleen bestemd was voor het meten van de hoogte van de zon en niet die van, bijvoorbeeld, torens of andere hemellichamen.

Nu willen we achterhalen hoe de declinatie- c.q. datumlijnen werden getrokken. De straal van de belangrijkste datumbogen, die van de eveningen en de zonnenevende, werd opgemeten door cirkels te passen over de gegraveerde cirkels op een foto van het kwadrant. Daartoe werd de foto geïmporteerd in een tekenprogramma (TurboCadTM). De grootte van de straal werd daarna 'genormaliseerd' door deze te delen door de diameter van de middagcirkel. De waarden zijn te vinden in Tabel 1, samen met die voor twee Richard II- kwadranten (fig. 8 toont een ervan). In de tabel zijn ook de theoretische waarden aangegeven voor een breedtegraad van 52° en een helling van de aardas van 24° (= de declinatie bij de zonnenevende). De theoretische waarden zijn

$$r_n = \sin(90^\circ - \varphi + \delta)$$

waarbij r_n de genormaliseerde straal van de declinatie lijn is en δ de zonsdeclinatie.

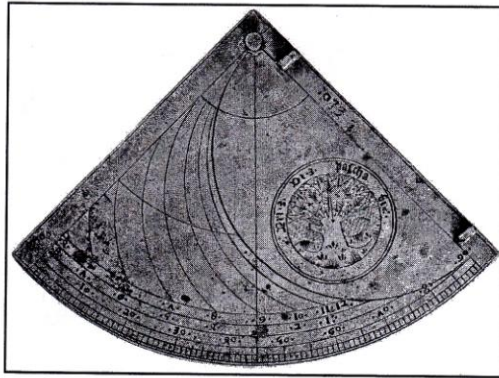


Fig. 8. Het Richard II-kwadrant van 1398 in Dorchester. (Foto gemaakt door de auteur, met dank aan het Dorset County Museum).

	Zutphen	Dorset Museum Richard II	Bonhams Richard II	Theoretisch
Zomerzonnenevende	91,2	89,3	88,9	88,7
Eveningen	64,0	63,6	61,2	62,3
Winterzonnenevende	24,2	25,2	23,4	25,0

Tabel 1. Vergelijking van de stralen van de declinatiebogen bij drie kwadranten voor gelijke uren (telkens uitgaande van een diameter = 100 van de middagcirkel). Als helling van de aardas is 24° genomen en als breedtegraad $52,0^\circ$. Zie ref. 11 voor details over de Richard II-kwadranten.

Tabel 1 toont aan dat de waarden voor het Zutphense kwadrant in grote trekken overeenstemmen met die van beide ietwat latere Richard II-kwadranten evenals met de theoretische waarden. Testen met andere parameterwaarden bevestigen de veronderstelde breedtegraad en helling van de aardas.

Een vergelijkbare exercitie kan uitgevoerd worden op de uurbogen. Het resultaat vindt men in fig. 9, waaruit blijkt dat de cirkels in dit geval niet duidelijk geordend zijn. De meting van de zonshoogte bij de eveningen (waar de helling van de aardas geen rol speelt) geeft een fout aan die oploopt tot 1,7° voor de bogen van 3 en 9 uur (zie tabel 2). Dit is een aanwijzing dat het instrument en/of de gebruikte tabellen niet al te nauwkeurig waren.

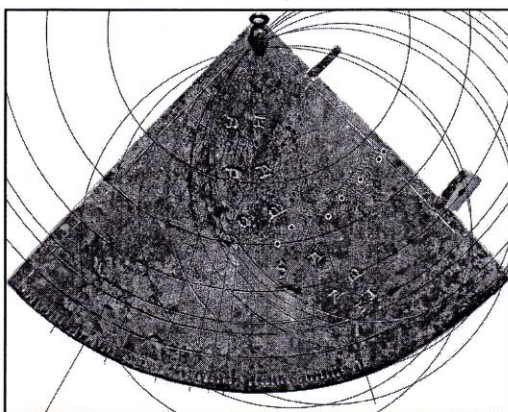


Fig. 9. Orthogonale foto van de voorzijde van het Zutphense kwadrant, met eroverheen de best passende uurbogen. De witomrande punten zijn de middelpunten van de cirkels.

Uur	Zonshoogte op de eveningen (°)		Fout (°)
	Gemeten	Theoretisch	
12	38,0	38,0	0
11	35,7	36,5	0,8
10	33,0	32,2	- 0,8
9	27,5	25,8	- 1,7
8	18,1	17,9	- 0,2
7	8,5	9,2	0,7
6	0	0	0

Tabel 2. Theoretische en gemeten waarden van de zonshoogte op het middaguur van de eveningen voor het Zutphense kwadrant. De theoretische waarden zijn gebaseerd op een breedtegraad van 52° (dicht bij het optimum).

Metallurgie

Gegevens over de samenstelling van het materiaal waaruit een instrument is gemaakt vormen extra aanwijzingen over de oorsprong en de geschiedenis ervan. Ze dragen ook bij tot de kennis van de metaalwinning en -bewerking, de gebruikte smeltmethodes, de vindplaatsen en de verspreiding in het middeleeuwse Europa, een onderwerp waarover opvallend weinig betrouwbare informatie te vinden is.

De samenstelling van het kwadrant werd onderzocht door middel van Röntgenfluorescentiespectrometrie (XRF)²¹. Deze methode heeft het voordeel dat ze snel en niet-destructief is, en ook geen sporen achterlaat. De resultaten zijn betrouwbaar op voorwaarde dat het meetsysteem deskundig wordt geijkt met geschikte ijkstalen. Ze levert echter een analyse van het oppervlak (met een grootte van enkele millimeters), waardoor ze geen goede waarden kan geven voor de diepere lagen van het voorwerp.

De resultaten worden weergegeven in tabel 3, met ter vergelijking die van vier andere instrumenten uit dezelfde periode. Het eerste wat opvalt is dat het Zutphense kwadrant van messing is met een zeer laag zinkgehalte. [In het rapport van Fermin heet het "tombak (rood messing)".] Dit kan men verwachten van een 'Europees' instrument omdat daar betrekkelijk weinig tinerts te vinden is. (Merk op dat het Richard II-kwadrant, dat op het eerste gezicht een 'Engels' instrument is, toch op het Europese vasteland zou kunnen gemaakt zijn, bijv. in Parijs. Het was immers een zeer waardevol object dat voor het koninklijk hof was bestemd. Het is dan ook gemaakt van messing met een hoog zinkgehalte.)

Het Zutphense kwadrant en het latere Grafendorfcompendium hebben beiden een beduidend lager zinkgehalte, wat typerend is voor de vroege 14de eeuw en beschouwd kan worden als een 'gewone' messingkwaliteit. De twee Engelse instrumenten daarentegen (de *quadrans novus* van Canterbury en het *horologium* van Norfolk) bevatten beiden een aanzienlijke hoeveelheid tin (en in mindere mate lood), wat een plaatselijke herkomst lijkt te bevestigen. Deze conclusies kunnen niet als definitief beschouwd worden aangezien in de gegevensbank onvoldoende vergelijkingsmateriaal beschikbaar is. Ze bevestigen wel het vermoeden dat de instrumenten, inclusief het Zutphense kwadrant, werden gemaakt in de buurt van de plaats waar men ze gebruikte.

Het Zutphense kwadrant is lichtjes verbogen en vertoont minstens twee duidelijke barstjes, die vanaf de markeringen van 14° en 34° naar binnen lopen. Het zijn duidelijk 'seizoensbarsten' langs de korrelstructuur in het messing, als gevolg van de blootstelling aan aarde die gewoonlijk ook een kleine hoeveelheid ammonia bevat²². Gezien de lange blootstelling, is de messingkwaliteit zeker niet minderwaardig te noemen.

Instrument	Datum	Cu	Zn	Sn	Pb	Andere
Zutphense kwadrant ^a	ca.1300	85	12,5	0,5	0,2	0,3 % Ag 0,7 % Fe
Richard II-kwadrant ^b	1396	78	22		sporen	
Grafendorf-compendium ^c	ca.1450	79	12	0,8	2	1,4 % Fe
Canterbury-quadrans novus ^d	1388 ?	87	5,3	3,4	1,5	0,2 % Ag 0,6 % Fe
Norfolk-horologium ^e	??	77	12	7,4	2,4	0,2 % Ag 0,9 % Fe

Tabel 3. Samenstelling van de metaallegeringen van het Zutphense kwadrant en vier andere middeleeuwse tijdmeetinstrumenten (in gewichtspercentage gemeten met de XRF-methode). De eerste drie instrumenten hebben een zeer laag tingshalte en mogen geklasseerd worden als vervaardigd uit 'continentale messing'. Voor de twee laatste is zg. 'Engelse messing' gebruikt.

- Metingen uitgevoerd door Dr. Bertil van Os van de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed (RCE).
- Een van vier bekende instrumenten (1396-1400), dit is het vroegste (ingehouden door Bonhams in 2012). De gegevens werden geleverd door Christopher Becker. De twee instrumenten in het British Museum hebben een ver-gelijkbare samenstelling (gegevens afkomstig van Dr. Susan La Niece en de auteur).
- Opgegraven in het Grafendorf-kasteel nabij Wenen. Analyse door Prof. Dipl. Ing. Dr. Manfred Schreiner (Akademie der Bildenden Künste), medegedeeld door Dr. Ronald Salzer.
- Gevonden in Canterbury tijdens opgravingen; momenteel in het British Museum. Analyse door Dr. Brian Gilmour en Dr. Peter Northover (Oxford University).
- Gevonden met behulp van een metaaldetector. Analyse door Dr. Brian Gilmour (Oxford University).

Implicaties en slotopmerkingen

Het Zutphense kwadrant is een belangrijke vondst. Met zijn vrij zekere datering van ca. 1300 (men mag ervan uit gaan dat het enkele jaren ouder is dan de grondlaag waaruit het is opgegraven), bewijst het dat kwadranten voor gelijke uren van dit type bijna een eeuw eerder in Europa werden gebruikt dan algemeen werd aangenomen. Het ontwerp ervan vloeit eenvoudig voort uit het vroegere basistype *quadrans vetus* voor één enkele breedtegraad en voor ongelijke uren, maar het was niet zo lastig in het gebruik als het geavanceerde *quadrans novus* of astrolabisch kwadrant dat in Europa verscheen in het begin van de 14de eeuw. Waarschijnlijk stond dit, rechtstreeks of indirect, in verband met het verschijnen van de eerste torenuurwerken omstreeks die tijd. Het duurde niettemin lang voordat het gebruik van ongelijke uren volledig verdween. En het duurde nog een eeuw alvorens horizontale en verticale zonnepijlers met poolstijlen ontwikkeld werden in Europa - hoewel hoogtemetende zonnepijlers (bijv. cilindrische zonnepijlers) al veel eerder bestonden.

Het Zutphense kwadrant roept een aantal vragen op die nog niet beantwoord kunnen worden. De eerste is wie de gebruiker ervan was. Waarschijnlijk was

het een ontwikkelde handelaar, rijk genoeg om zich een dergelijk instrument te kunnen veroorloven, intelligent genoeg om het te kunnen gebruiken én geïnteresseerd in de juiste tijd. Verschillende verwijzingen naar de tijdmeting in *The Canterbury Tales* van Geoffrey Chaucer tonen aan dat dit een vrij nieuw verschijnsel was. Handelaars in een Hanzestad en -haven hadden veel praktische redenen om de juiste tijd te willen weten. Het kwadrant zou daarvoor meer dan nauwkeurig genoeg zijn geweest en zijn breedtegraad van 52° zou een groot aantal andere Hanzehavens bestreken hebben, misschien met inbegrip van Engelse Hanzehavens als Norwich en Lynn (later Bishop's Lynn, daarna King's Lynn) in Norfolk.

De volgende vragen zijn: wie maakte het kwadrant en waar? Buiten het atelier van Jean Fusoris in Parijs, bijna een eeuw later, kennen we geen makers van wiskundige instrumenten in die periode. De samenstelling van de metaallegering én de breedtegraad laten vermoeden dat het min of meer ter plaatse werd vervaardigd of tenminste op het Europese continent. Of er één of meerdere ateliers van instrumentmakers waren, zal echter via andere bronnen moeten worden bewezen. De geschiedenis van de kwadranten kan wat dat betreft vergeleken worden met die van 14de eeuwse Europese astrolabia en *naviculae*²³, waarvan men eveneens weinig weet over instrumentmakers en hun ateliers.

Dankwoord

Ik ben de Zutphense archeoloog Bert Fermin uitermate dankbaar voor het feit dat hij mij op de hoogte heeft gebracht van de vondst, voor de vele verhelderende discussies en voor de toestemming om uitgebreid uit het officiële verslag (ref. 1) te citeren. Zijn collega's Davy Kastelein, Michel Groothedde en Elisa de Vries stelden tekeningen en ander informatiemateriaal ter beschikking. Dr. Jenny Cripps (Dorset County Museum) was zo vriendelijk mij het Richard II-kwadrant in Dorchester te laten bestuderen, terwijl Christopher Becker mij waardevolle foto's en XRF-gegevens bezorgde van het Richard II-kwadrant van 1396 dat zich nu in Australië bevindt. Brian Gilmour (Oxford Research Laboratory for Archaeology and the History of Art) bezorgde mij een aantal XRF-resultaten. Ronald Salzer (Universiteit van Wenen) bezorgde mij inlichtingen over het Grafendorf-compendium en Michael Lowne stimuleerde een aantal nuttige discussies.

John Davis (GB)
john.davis@btinternet.com

Referenties en toelichtingen

16. Het diagram in MS Ashmole 19 (f.54) is te zien in Gunther (ref. 8), p. 172.
17. J.E. Morrison: *The Astrolabe*, Janus, Rehoboth Beach (2007). De formules voor het kwadrant voor ongelijke uren staan op p. 213-220; die voor het effect van de breedtegraad op de afwijkingen ten opzichte van de perfecte cirkelvorm op p. 220.
18. J. Davis: 'Robert Stikford's "De Umbris Versis et Extensis"', BSS Bulletin 23 (iv), p. 24-28 (december 2011).

19. Deze en de andere vergelijkingen kan men afleiden uit de basisbeginselen of basisteksten met betrekking tot zonnewijzers.
20. 'nauwkeurig' betekent hier dat de foto werd genomen met een camera exact evenwijdig aan het kwadrant en met een minimale beeldvervorming door de lens. In het geval van het Zutphense kwadrant was dat niet gemakkelijk omdat het lang niet vlak is. Als gevolg daarvan stemmen de computermatig getekende bogen niet altijd overeen met die van de foto.
21. Ik ben dank verschuldigd aan dr. Bertil van Os van de Nederlandse Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed (RCE) voor de XRF-metingen en aan Bert Fermin voor de organisatie ervan. De bronnen van andere gegevens worden vermeld onder de tabel.
22. Zie, bijvoorbeeld, *Stress Corrosion Cracking*, National Physical Laboratory, www.npl.co.uk/upload/pdf/stress.pdf, HMSO (2000).
23. C. Eagleson: *Monks, Manuscripts and Sundials: the Navicula in medieval England*, Brill Academic Publishers (2010).

De Nederlandse vertaling van dit artikel werd gemaakt door André Reekmans, bestuurslid van de Zonnewijzerkring Vlaanderen vzw. De eindredactie ervan werd verzorgd door Eric Daled, bestuurslid en secretaris van dezelfde vereniging, in overleg met Frans Maes, lid van de Zonnewijzerkring Nederland.

Rechtzetting

In de bijschriften bij de illustraties 3, 4, 5 en 6 is een naam foutief geschreven: het gaat immers om Bert Fermin (zie deel 1 van dit artikel in Zonnetijdingen nr. 70).

Nieuwe zonnewijzer voor de Volkssterrenwacht AstroLAB IRIS

Na de tentoonstelling van de zonnewijzermaquettes van Aimé Pauwels (september 2011 - februari 2012) in het AstroLAB IRIS te Zillebeke (Ieper), stelden enkele stafleden van deze project- en volkssterrenwacht voor om tegen de westelijke muur van hun gebouw (50,818° N en 2, 909972° O) een verticale zonnewijzer te plaatsen.

Het zonnewijzerontwerp moest aansluiten op de educatieve doelstelling van de twee huidige plaatselijke observatoria (AstroLAB I & II), waar uitgebreide astronomische waarnemingen worden gedaan. De zonnewijzer moest ook duidelijk zichtbaar zijn vanaf de Verbrandemolenstraat, de weg die gebruikt wordt door de bezoekers van het provinciaal domein "De Palingbeek". Mede daarom was het de uitdrukkelijke wens om zowel de zonnetijd als de kloktijd aan te geven. Ontwerp en realisatie verliepen in verscheidene fasen.

Muuroriëntatie AstroLAB I

Voor het meten van de muuroriëntatie werden twee verschillende methoden gebruikt:

- via het tijdstip waarop de zon de muur gaat 'bezonnen';
 - met een blokwinkelhaak (als alternatieve controle).
- Bij de eerste meting op 8 maart 2011 was er cumulatieve van de zon met de muur om 10h 46m.