

Wase baksteen gedateerd. Natuurwetenschappelijk dateringsonderzoek in de Sint-Andreas- en Sint-Gislenuskerk in Belsele (Sint-Niklaas)



Vincent Debonne¹, Ian Bailiff², Sophie Blain³, Souad Ech-chakrouni⁴, Jozef Hus⁵, Mark Van Strydonck⁶ & Kristof Haneca⁷

Inleiding

De nauwkeurige datering van middeleeuwse gebouwen is vaak problematisch⁸. Gedateerde geschreven bronnen over de bouwgeschiedenis zijn niet voorhanden of zijn door hun bondigheid vatbaar voor diverse interpretaties. Vormelijke kenmerken staan niet altijd garant voor een nauwe en stevig gegronde datering. Een gebouw kan slechts algemene formele trekken vertonen die behoren tot een in tijd en ruimte wijdverspreid vormenrepertorium. Ook bouwmaterialen en constructietechnieken kunnen soms niet meer bieden dan grove chronologische aanwijzingen.

Sinds enkele decennia wordt in toenemende mate gebruikgemaakt van natuurwetenschappelijke technieken voor de absolute datering van middeleeuwse gebouwen. Daterend dendrochronologisch onderzoek van dakkappen of bouwhout in het algemeen is intussen ingeburgerd in het bouwhistorisch onderzoek. Een precieze dendrochronologische datering is echter niet altijd vanzelfsprekend. Soms is er geen oorspronkelijk bouwhout bewaard gebleven of blijkt het hout dendrochronologisch niet dateerbaar. Snel en onregelmatig gegroeid hout zien we namelijk vaak in middeleeuwse gebouwen in Vlaanderen⁹.

Andere technieken laten toe om de materialen van het metselwerk te dateren. De ouderdom van mortelspecie kan worden bepaald met ¹⁴C-datering. Baksteen kan worden gedateerd aan de hand van de elektrische lading die na het bakken van de vormeling hernieuwd wordt opgeslagen in luminescente kristallen als kwarts en veldspaat. Dateringstechnieken volgens dit principe zijn thermoluminescentie (TL) en optisch gestimuleerde lu-

minescentie (*optically stimulated luminescence*, OSL). Volgens recent experimenteel onderzoek lenen beide technieken zich ook voor de datering van mortel. In een archeomagnetische analyse (AM) wordt baksteen gedateerd door de inclinatie te meten van het aardmagnetische veld geregistreerd in ferromagnetische mineralen vervat in baksteen, veelal ijzeroxides, en vervolgens die meting te toetsen aan een gedateerde referentiecurve van die inclinatie.

Verskillende natuurwetenschappelijke analyses en dateringen van middeleeuwse gebouwen werden eerder gecombineerd toegepast in West-Frankrijk¹⁰. Dirk J. de Vries verrichtte vergelijkend onderzoek naar de datering van middeleeuwse bakstenen gebouwen in westelijk België en Nederland¹¹. Dendrochronologische analyses van bouwhout, ¹⁴C-dateringen van mortel en datering van baksteen met TL werden met elkaar geconfronteerd. Als er origineel bouwhout aanwezig was, was dendrochronologie de meest succesvolle dateringsmethode. Van de negen ¹⁴C-dateringen van organisch materiaal in mortel waren er slechts twee plausibel, 'een niet corresponderende score van 78%'¹². Het grote probleem bij het dateren van organische partikels in mortel, meestal houtskool, is de herkomst van het materiaal. De al dan niet kleine stukjes hout zijn afkomstig van het branden van de kalksteen waaruit de mortel is gemaakt. In een aantal gevallen is aangetoond dat hiervoor hout werd gebruikt van gebouwen die voordien op dezelfde plaats stonden. In andere gevallen werd steenkool gebruikt. Slechts in de gevallen dat er vers hout werd

¹ Onderzoeker Bouwkundig Erfgoed, agentschap Onroerend Erfgoed, Koning Albert II-laan 19, bus 5, 1210 Brussel, vincent.debonne@rwo.vlaanderen.be, bouwhistorisch onderzoek.

² Luminescence Laboratory, Department of Archaeology, University of Durham, South Road, DH1 3LE, UK, ian.bailiff@durham.ac.uk, luminescentieonderzoek op de bakstenen.

³ Centre Européen d'Archéométrie, Université de Liège, Allée du 6 Août 17, 4000 Liège, Belgium & Centre de Recherche en Physique Appliquée à l'Archéologie, Institut de Recherche sur les ArchéoMATériaux, CNRS-Université de Bordeaux

3, Esplanade des Antilles, 33607 Pessac cedex, France, blain.sophie@gmail.com, luminescentieonderzoek op de mortel.

⁴ Centre de Physique du Globe de l'IRM, Rue du Centre 1, 5670 Dourbes (Viroinval), sechchack@meteo.be, archeomagnetische analyse.

⁵ Centre de Physique du Globe de l'IRM, Rue du Centre 1, 5670 Dourbes (Viroinval), jozef.hus@meteo.be, archeomagnetische analyse.

⁶ Laboratorium voor ¹⁴C-dateringen, Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium, Jubelpark 1, 1000 Brussel, radiokoolstofdateringen.

⁷ Onderzoeker erfgoedbeheer, dendrochronoloog, agentschap Onroerend Erfgoed, Koning Albert II-laan 19, bus 5, 1210 Brussel, kristof.haneca@rwo.vlaanderen.be, dendrochronologisch onderzoek.

⁸ Over absolute datering in het bouwhistorisch onderzoek, zie Stenvert & van Tussenbroek 2007, 55-61.

⁹ Houbrechts 2000.

¹⁰ Sapin *et al.* 2008.

¹¹ De Vries 2000.

¹² *Idem*, 82.

gebruikt, blijkt er een overeenstemming te zijn tussen de bouwdatum en de ^{14}C -ouderdom¹³.

In het onderzoek van De Vries bleken de TL-dateringen van baksteen betrouwbaarder dan de ^{14}C -datering van organisch materiaal in mortel. Van de twaalf uitgevoerde analyses pasten “er vijf (42%) geheel niet bij de veronderstelde of bij een anderszins verkregen datering”¹⁴. De onzekerheid op de TL-dateringen was vergelijkbaar met de uitgevoerde ^{14}C -dateringen.

Voortbouwend op het onderzoek van De Vries werd de parochiekerk Sint-Andreas- en Sint-Gislenus in Belsele¹⁵ (Sint-Niklaas) onderworpen aan natuurwetenschappelijke dateringstechnieken. Het onderzoek focuste op de in baksteen gebouwde lichtbeuk van het middenschip en de bijbehorende dakkap, traditioneel gedateerd in het tweede kwart van de 13de eeuw¹⁶. Om die datering te bevestigen dan wel bij te stellen, werd allereerst een dendrochronologisch onderzoek van de dakkap uitgevoerd.

In tweede instantie werd daterend natuurwetenschappelijk onderzoek uitgevoerd van het bakstenen metselwerk onder de dakkap. De mortelspecie van de voegen werd gedateerd met de ^{14}C -methode, fragmenten van bakstenen werden geanalyseerd met OSL en AM. Ook werd de mogelijkheid van datering van mortel met behulp van OSL nagegaan. De opzet was om de mogelijkheden en beperkingen van de verschillende technieken na te gaan. Van alle delen in de kerk is het bakstenen metselwerk van de lichtbeuk van het middenschip hiervoor het meest aangewezen. Ten eerste kon een dendrochronologische datering van de, zoals zou blijken, authentieke dakkap dienen als referentie

voor de dateringen van de mortelspecie en van de bakstenen. Ten tweede is het middeleeuwse metselwerk van de lichtbeuk sinds de verhoging van de zijbeuken in de eerste helft van de 16de eeuw afgesloten gebleven van buitenlucht. Het metselwerk bleef ook onaangeroerd tijdens de restauraties van 1906, 1964-1965 en 1979-1981¹⁷.

Dit alles creëert een ideale context om de beschikbare natuurwetenschappelijke dateringstechnieken toe te passen en aan elkaar te toetsen. Voor Vlaanderen alvast een unieke en waardevolle gevalstudie.

1 Bouwgeschiedenis van de kerk

De oudste geschreven vermeldingen van de parochie van Belsele dateren uit 1220 en 1236¹⁸. De stichting van de parochie gebeurde misschien in 1217¹⁹.

De huidige parochiekerk heeft een kruisvormige plattegrond met een westtoren, een driebeukig schip met twee lagere dwarsarmen en een eenbeukig koor met een drizijdige apsis (fig. 1-2). In het pseudobasilicale schip wordt de middenbeuk onrechtstreeks verlicht door de vensters van de zijbeuken. De zijbeuken zijn samen met het middenschip gevat onder één dak, dat een knik vertoont op de overgang van de zijbeuken naar het middenschip.

Tijdens de aanleg van vloerverwarming in 1978-1979 werden archeologische opgravingen uitgevoerd in de kerk. Aangevuld met bouwhistorische observaties, archivalisch onderzoek en gegevens van eerdere opgravingen uit 1965 en 1969, werd vol-

FIG. 1 Buitenzicht van de Sint-Andreas- en Sint-Ghislenukerk in Belsele.

Exterior view of the Saint Andrew's and Saint Ghislenus's church at Belsele.



¹³ Zie ongepubliceerde data van de kerk van Velzeke op <http://c14.kikirpa.be/search.php>.

¹⁴ De Vries 2000, 82-83.

¹⁵ De Inventaris van het Bouwkundig Erfgoed

[online: <http://inventaris.vioe.be/dibe>], ID 15271.

¹⁶ Demey 1985, 50. Een beknopte beschrijving en bouwgeschiedenis van de kerk biedt Demey & De Kegel 1991, 6-22.

¹⁷ Demey 1986, 18-24, 28-33.

¹⁸ Vossen 1942, 54, 101.

¹⁹ *Idem*, 54.

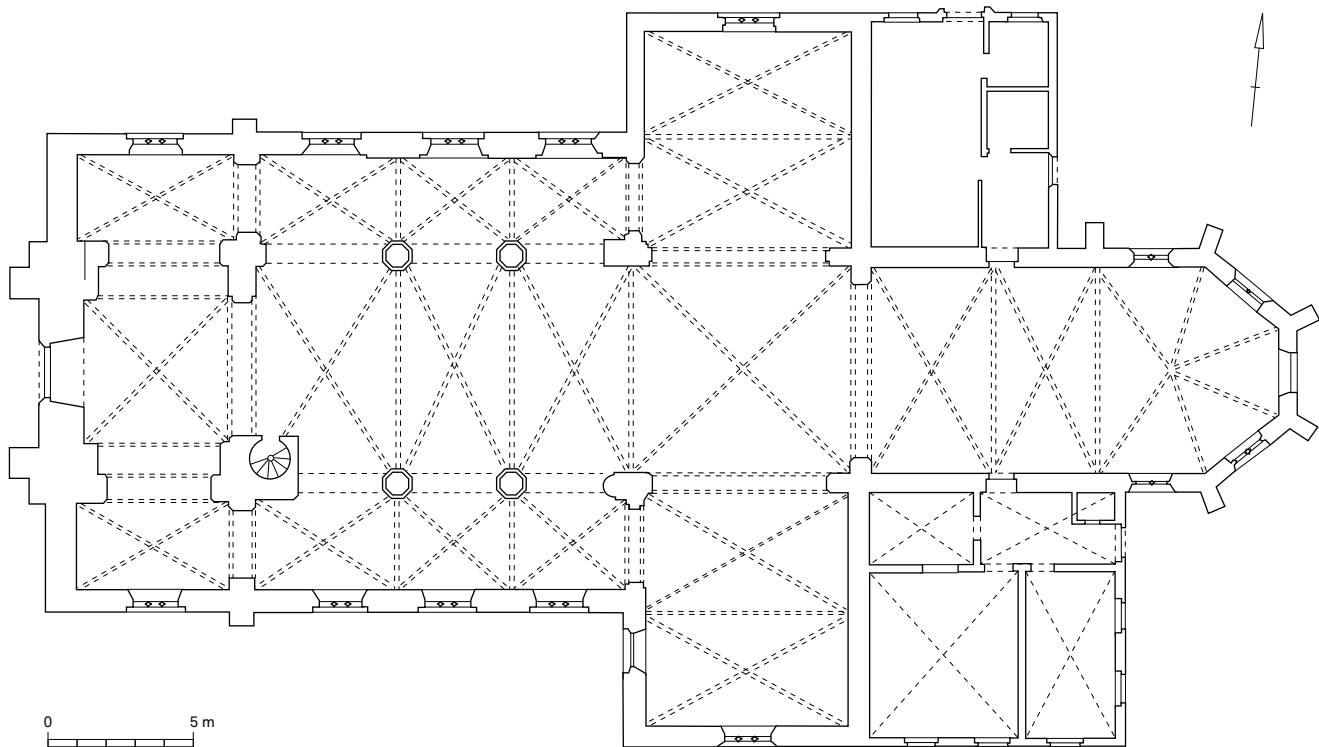


FIG. 2 Plattegrond van de Sint-Andreas- en Sint-Gislenuskerk in Belsele.
Plan of the Saint Andrew's and Saint Ghislenus's church at Belsele

gende bouwgeschiedenis gereconstrueerd²⁰. Aan het huidige kerkgebouw zou een romaans gebouw voorafgaan, waarvan de vermeende resten nog boven- en ondergronds bewaard zijn. Het romaanse kerkje bestond uit een driebeukig schip van vijf traveeën en een klein oostelijk koor. Er was geen transept. “Afgaande op de uiterst eenvoudige aanleg en afwerking” werd een datering in de vroege 11de of zelfs 10de eeuw voorgesteld²¹. Andere en meer overtuigende argumenten voor die vroege datering zijn er niet, zodat een bouw van het romaanse kerkje in de 12de eeuw vooralsnog aannemelijk is.

Het romaanse middenschip werd in de eerste helft van de 13de eeuw verhoogd met een nieuwe lichtbeuk, gebouwd in baksteen. De bijbehorende dakkap op het middenschip is tot op vandaag bewaard gebleven. Het vloerniveau van de benedenkerk werd verhoogd en bedekt met geglazuurde vloertegels. De datering van de bouw van de nieuwe lichtbeuk steunt op de vermoede nauwe banden tussen Belsele en de verdwenen cisterciënzerabdij van Boudelo bij Stekene²². Een oorkonde uit 1223 waarin gravin Johanna van Constantinopel (1205-1244) aan die abdij twee bunders land schenkt “om bakstenen te vervaardigen”²³, zou toelaten om de bouw van de bakstenen lichtbeuk in Belsele kort na 1223 te dateren, in het tweede kwart van de 13de eeuw.

De weststoren zou zijn toegevoegd in het midden van de 13de eeuw²⁴. Gelijkijdig werden toen de romaanse zijbeuken verlengd tot aan de weststoren en voorzien van een nieuw buitenparement in kalkzandsteen. Volgens de kroniek van het Land van Waas door François-Joseph de Castro (1688-1766) werd het huidige koor gebouwd in 1432²⁵. Kort daarna, omstreeks 1450, werden de twee dwarsarmen toegevoegd²⁶. In de eerste helft van de 16de eeuw werden de muren van de zijbeuken verhoogd; het jaartal 1533 in het glasraam van een venster in de zuidelijke zijbeuk zou hiernaar verwijzen²⁷. De lessenaarsdaken van de zijbeuken werden mee verhoogd om aan te sluiten op de aanzet van het zadeldak van het middenschip. De 13de-eeuwse bovenlichten verloren zo hun vensterfunctie. In de jaren 1550 en 1560 kregen de middenbeuk en de zijbeuken een stenen kruisribgewelf en werden de in onbruik geraakte 13de-eeuwse vensters van het middenschip gedicht²⁸. In november 1570 werd de kerk getroffen door een blikseminslag²⁹. De brand die hierop volgde zou vooral de toren hebben beschadigd, terwijl de rest van het kerkgebouw niet werd beschadigd. Het koor werd pas in 1643 overwelfd³⁰.

Tot zover de bouwgeschiedenis zoals tot nu toe bekend.

20 Demey 1985, 23-50.

21 *Idem*, 37.

22 *Idem*, 49-50.

23 In deze oorkonde verkoopt de gravin gronden tussen *besselsleda* en *alninclaruord* aan de abdij van Boudelo. Als aalmoes schenkt ze ook *duo bonaria*

terre apud stekela ad conficiendes lateres. Rijksarchief Gent (RAG), Boudelo n° 8, f° 166 r° & v°.

24 Demey 1985, 50-55.

25 Van Naemen 1884, 354; Demey 1985, 56-58.

26 *Idem*, 59-62.

27 *Idem*, 64-67.

28 *Idem*, 68-81.

29 Van Naemen 1885, 182; Demey 1985, 71-72.

30 Demey 1985, 84.

2 De dakkap van het middenschip

2.1 Beschrijving en typologische situering

De kerk van Belsele bewaart opmerkelijke laatmiddeleeuwse dakkappen boven het middenschip, de twee dwarsarmen en het koor. De sporenkap op het middenschip is de oudste van de vier dakkappen (fig. 3). Het was oorspronkelijk een ziende kap die echter sinds de 16de eeuw aan het oog wordt onttrokken door het stenen kruisribgewelf. De bouw van dat gewelf leidde ook tot opheffing van de bovenlichten van het middenschip (fig. 4). Bovenaan in de dakkap is brandschade zichtbaar; van de 31 oorspronkelijke gespannen hebben er slechts vier een nog intacte

nokverbinding. De huidige nok van de dakkap wordt gevormd door de dunne sporen die tussen de oorspronkelijke gespannen zijn geplaatst. De ingrijpende brandschade doet vermoeden dat na de blikseminslag in 1570 de brand toch is overgeslagen van de toren naar het kerkschip. In de liezen³¹ van het gewelf liggen tientallen fragmenten van daktegels (fig. 4). Wellicht werden ze hier gedumpt tijdens een van de vernieuwingen van de dakbedekking met leien tijdens de 18de eeuw³².

De originele gespannen van de dakkap bestaan uit sporen (sectie ca. 13 x 13 cm) verstevigd met twee hanenbalken (fig. 5-6). De gebogen standzonen en de korbelen van de onderste hanenbalk imiteren de vorm van een tongewelf. Nergens werden resten

FIG. 3 Zicht op de dakkap van het middenschip.

View of the roof of the middle aisle.



FIG. 4 Gedicht venster van het middenschip, gezien van op het gewelf van het middenschip. Voor het venster liggen brokstukken van daktegels van een van de eerdere bedakingen van de kerk.

Closed window of the middle aisle, seen from the vault of the middle aisle. In front of the window are the remains of roof tiles from earlier coverings of the church.



³¹ “Meestal gezegd van de aan de boven- of buitenzijde van een kruisgewelf zichtbare indieping boven de geboorte” van het gewelf (Haslinghuis 2005⁵, 306).

³² De daken van de kerk werden met leien bedekt in 1722, 1732, 1752, 1769 en 1780 (Demey 1985, 94).

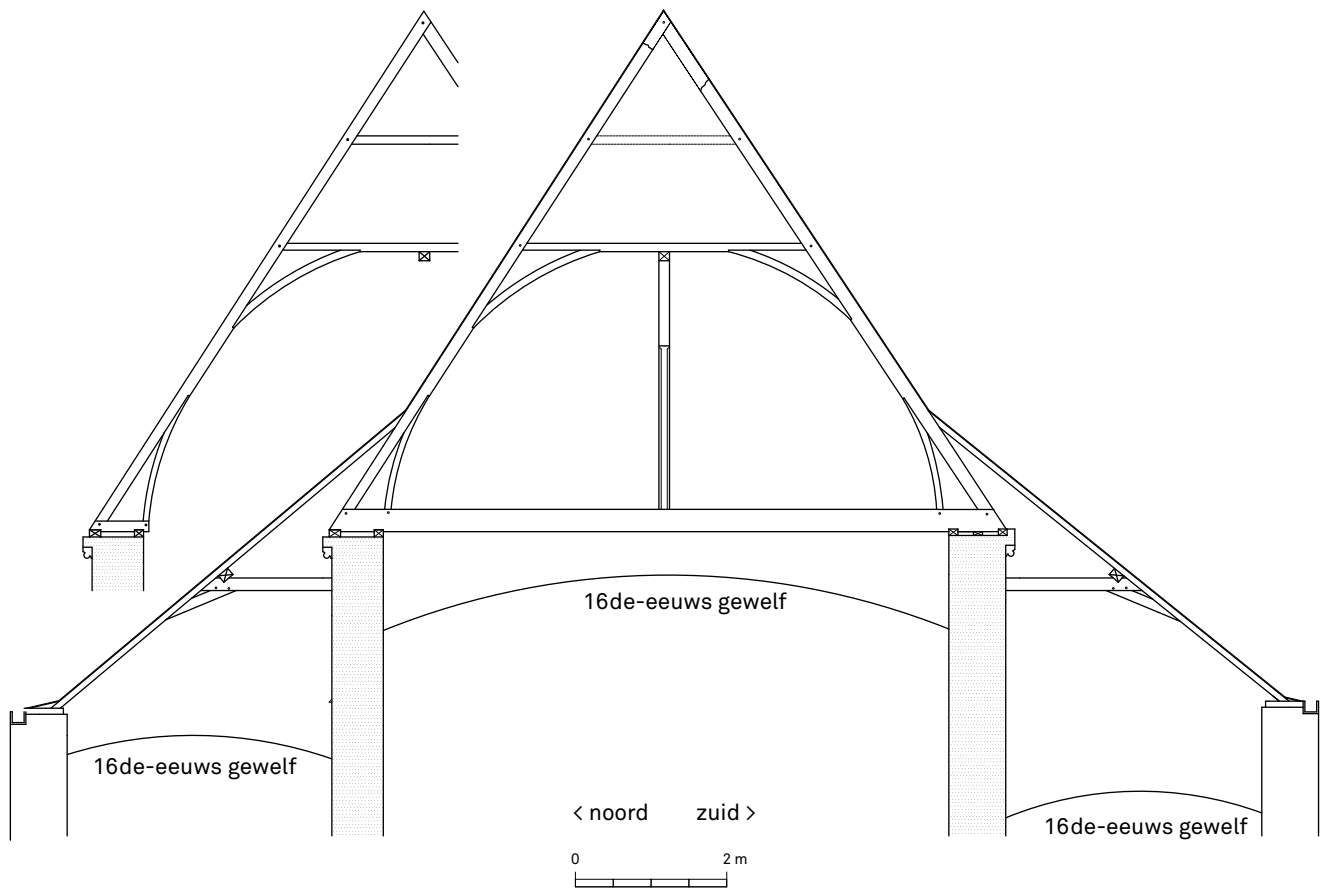


FIG. 5 Dwarsdoorsnede van het schip boven de gewelven van middenbeuk en zijbeuken.
Cross section of the nave above the vaults of the middle and side aisles.

van een beplanking aangetroffen; de constructie van de dakkap was dus volledig zichtbaar. De sporen en de standzonen steunen op blokkelen, ingelaten op een dubbele muurplaat aan de noordzijde en op een driedubbele muurplaat aan de zuidzijde. Ieder zesde gespan van de dakkap is voorzien van een trekbalke (sectie ca. 28 x 25 cm) waarop de standvink van de hanenbalkfliering staat. De vier hoeken van de standvinken zijn afgeschuind tot aan de gebogen korbelen van de hanenbalkfliering.

Getoogde pen-en-gatverbindingen verzekeren de bevestiging van de sporen aan de blokkelen en de trekballen. Dezelfde verbinding werd gebruikt voor de aansluiting van de hanenbalken op de sporen. Waar bewaard zijn de nokverbindingen halfhouts. De korbelen zijn met tanden ingelaten op de sporen en hanenbalken. Onderaan, tegen de sporen, is deze verbinding verstevigd met een toognagel en twee of meer spijkers. Bovenaan, tegen de hanenbalken, zijn enkel spijkers gebruikt. Ook de standzonen zijn bovenaan met een tand ingelaten in de sporen, verstevigd met een toognagel en twee of meer spijkers. Onderaan zijn ze koud³³ op de blokkelen of trekballen geplaatst. De standvinken en hun korbelen zijn met getoogde en gespijkerde

pen-en-gatverbindingen ingelaten in de hanenbalkfliering. Op één schuine liplas na volgen de vier ballen van de hanenbalkfliering elkaar koud op. De balk tussen de twee meeste westelijke standvinken is niet meer oorspronkelijk.

In de dakkap werden diverse merktekens opgemerkt (Bijlage 1). De meeste merken zijn smalle insnijdingen in het hout; het zijn wellicht eigendomsmerken. De telmerken bevinden zich aan de binnenzijde van de samengestelde onderdelen van de dakkap. Dat blijkt uit het zuidelijke korbelt van het gespan 19, thans los liggend op de trekbalke van het gespan ernaast. Op de zijde die oorspronkelijk tegen de onderzijde van de hanenbalk was bevestigd, is het telmerk 19 zichtbaar.

Vormelijke en bouwtechnische kenmerken laten toe om de dakkap minstens in de 13de eeuw te situeren. Het oudste voorbeeld in de Zuidelijke Nederlanden van een houten ton met gebogen korbelen en standzonen bevond zich in het dormitorium van de voormalige cisterciënzerabdij Val-Saint-Lambert in Seraing. Deze dakkap, oorspronkelijk met beplanking, kon dendrochronologisch worden gedateerd in 1233-1234³⁴. Dakkapen met boogvormig verstevigde gespannen kenden een opmerke-

³³ “Gezegd van een ontmoeting van twee bouwdeelen, als de samenvoeging bot, d.w.z. zonder verbinding, vertanding, vergaring of verstek (houtconstructies), tegen of op elkaar geplaatst wordt zonder dat de deelen in elkaar grijpen” (Haslinghuis 2005⁵, 284).

³⁴ Coomans 2002, 156-158. De dakkap werd grotendeels vernield tijdens een brand in 1983. Dendrochronologische dateringen worden verder aangegeven met een ‘d’ na het jaartal.

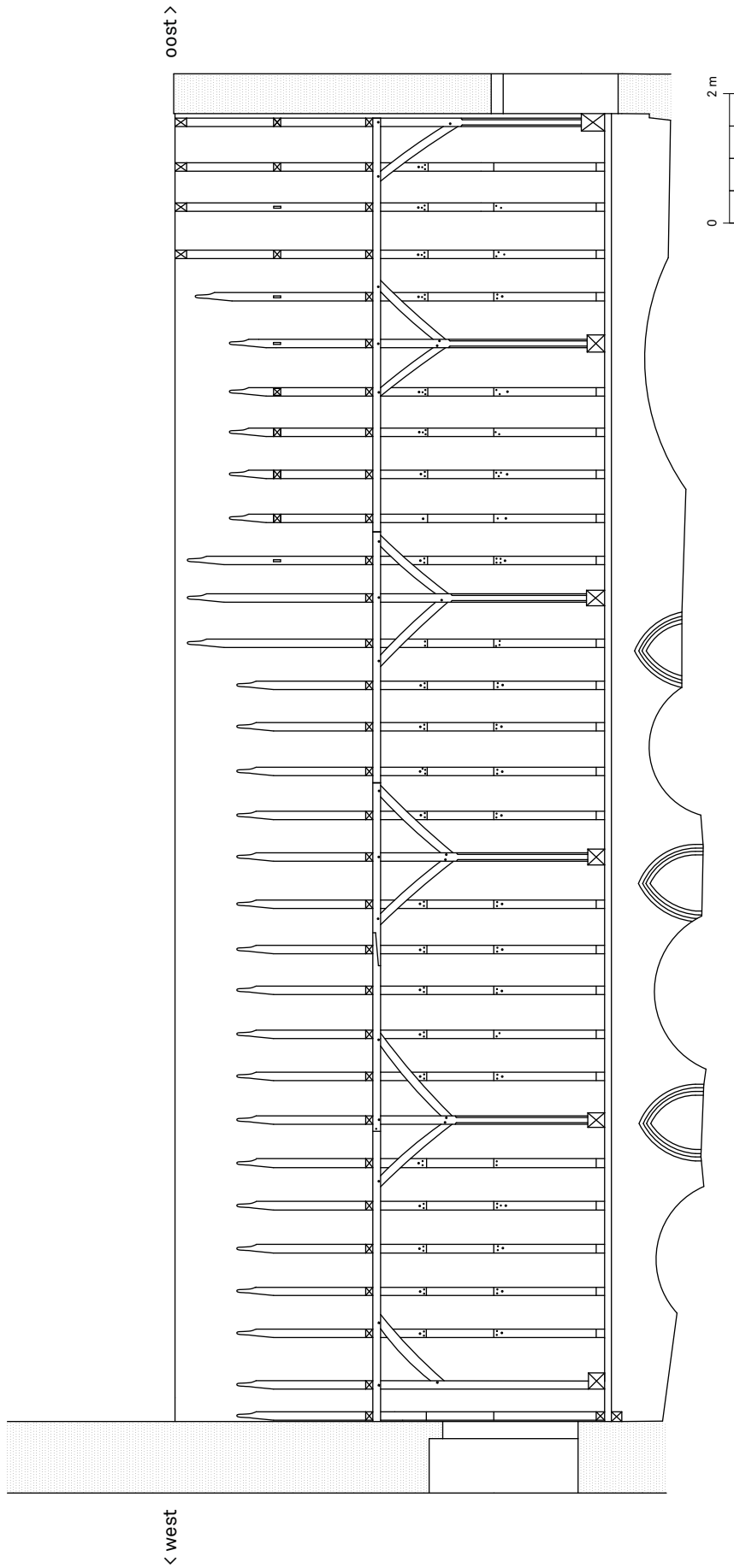


FIG. 6 Langdoorsnede van het middenschip boven de gewelven, gezien naar het noorden.
Longitudinal section of the middle aisle above the vaults, seen towards the north

lijke populariteit na het midden van de 13de eeuw³⁵. Voorbeelden zijn de dakkappen van de franciscanenkerk Saint-Antoine³⁶ (1247-1253d) en de begijnhofkerk Saint-Christophe³⁷ (midden 13de eeuw) in Luik. In beide kerken gaat het om volwaardige houten tonnen met beplanking. De dakkap van het dormitorium (1253-1263d) van het voormalige dominicanenklooster in Leuven heeft gebogen korbelen en standzonen, maar geen beplanking³⁸. Ook standvinken en makelaars zijn er achterwege gelaten. Dichter bij Belsele heeft de sporenkap van de kapel (1260-1265d) van het Bijlokehospitaal in Gent dezelfde opbouw³⁹.

De dakkap van Belsele wordt behalve de gebogen korbelen en standzonen gekenmerkt door een hanenbalkfliering op standvinken. In de Zuidelijke Nederlanden komen hanenbalkflieringen in gebruik na het midden van de 13de eeuw, bijvoorbeeld in de dakkappen van het koor van de kathedraal van Doornik (1252-1259d)⁴⁰ en van het koor van de dominicanenkerk in Leuven (1253-1263d voor het westelijke deel en 1260-1265d voor het oostelijke deel)⁴¹. Ook in het graafschap Vlaanderen situeren de eerste toepassingen van hanenbalkflieringen zich in de tweede helft van de 13de eeuw. Voorbeelden zijn de dakkappen van de Onze-Lieve-Vrouwekerk in Brugge (ca. 1270-1280)⁴², de vroegere westvleugel van de lakenhalle in Ieper (laatste kwart 13de eeuw)⁴³, de Onze-Lieve-Vrouwekerk in Kortrijk (ca. 1250-1300)⁴⁴ en de Sint-Walburgakerk in Veurne (1265-1275d)⁴⁵.

Samengevat suggereren voornoemde kenmerken voor de dakkap in Belsele eerder een bouw na het midden van de 13de eeuw dan in het tweede kwart van de 13de eeuw, zoals tot nu toe werd aangenomen.

2.2 Het dendrochronologisch onderzoek

2.2.1 Bemonsteren, meten & synchroniseren

Alle onderdelen van de sporenkappen zijn gemaakt uit Europees eikenhout. Botanisch gezien kan het over twee boomsoorten gaan, zomereik of wintereik (respectievelijk *Quercus robur* L. of *Q. petraea* (Matt.) Liebl.), maar beide soorten zijn heel moeilijk van elkaar te onderscheiden op basis van hun houtstructuur⁴⁶. Deze houtsoorten zijn uitermate geschikt voor dendrochronologisch onderzoek⁴⁷. Een grondige studie van de groeiringen op het bouw hout kan een zeer nauwkeurige en betrouwbare datering opleveren van het tijdstip waarop bomen werden geveld om deze kap te bouwen. Van alle natuurwetenschappelijke dateringsmethodes is dendrochronologie nog steeds de meest precieze. In het beste geval kan een veldatum tot op het seizoen nauwkeurig worden bepaald.

Tijdens twee campagnes werden in totaal 26 boorkernen genomen uit evenveel houten onderdelen van de kappen van het middenschip (18), de zuidelijke dwarsarm (5) en het koor (3). Een overzicht van de staalname is te zien in Bijlage 1. Alle boorkernen werden daarna grondig opgeschuurd om de groeiringen duidelijk zichtbaar te maken (fig. 7). Uiteindelijk werden ze met behulp van een stereomicroscop en meettafel zorgvuldig opgemeten. Daarbij werd het aantal aanwezige spinthoutringen ook nauwkeurig geregistreerd (tabel 1). Dit laatste was niet altijd even vanzelfsprekend omdat het spinthout, indien nog aanwezig, doorgaans sterk is aangetast door insectenvraat of gedegra-



FIG. 7 Boorkernen uit het schip (boven) en transept (onder). Er is tussen beide een duidelijk verschil in de gemiddelde breedte van de groeiringen. *Increment cores from the middle aisle (top) and transept (bottom). There is a clear difference in average ring-width between both samples.*

35 Hoffsummer 2009, 180-181.

36 *Idem*, 176-177; Coomans 2001, 88-89.

37 Coomans 2006a, 368-369. De middeleeuwse dakkap werd vervangen tijdens de restauratie van de begijnhofkerk door architect Auguste Van Assche in 1885-1897.

38 Coomans 2006b, 199-202.

39 Hoffsummer 2009, 180-181.

40 *Idem*, 181-182.

41 Coomans 2006b, 187-191.

42 Van Eenhooge 2009, 31-33. Het gaat om de hanenbalkfliering in het westelijke deel van de dakkap van het koor, opgetrokken omstreeks 1270-1280, en de hanenbalkfliering die gelijktijdig werd toegevoegd aan de oudere sporenkap van het middenschip. Beide hanenbalkflieringen bleken dendrochronologisch niet dateerbaar.

43 Janse & Devliegher 1962, 339-341.

44 *Idem*, 337. De dakkappen van het middenschip, zuidtransept en koor bleken dendrochronologisch niet dateerbaar, Haneca 2010.

45 Janse & Devliegher 1962, 346; Hoffsummer 2009, 218-219.

46 Feuillat *et al.* 1997.

47 Baillie 1995; Eckstein *et al.* 1984; Haneca *et al.* 2009.

TABEL 1

Overzicht van de onderzochte boorkernen met de locatie in de kap. Bij elke boorkern worden het totale aantal opgemeten groei-ringen, het aantal spintringen en de aanwezigheid van schors vermeld.

Overview of the examined increment cores and their location in the roof. For each increment core, the total number of measured tree-rings, the number of sapwood rings and the presence of bark are given.

Dendro-code	Aantal ringen	Spint-ringen*	Schors	Datering meest recente ring (AD)	Onderdeel
Schip					
BEL11.GAK.01	86	-	-	-	standzoon, zuid, gespan 10
BEL11.GAK.02	112	1	-	1253	spoor, zuid, gespan 16
BEL11.GAK.03	80	1	-	1250	spoor, zuid, gespan 19
BEL11.GAK.04	69	K/S	-	1247	spoor, noord, gespan 3
BEL11.GAK.05	101	10	-	1266	spoor, noord, gespan 11
BEL11.GAK.06	85	-	-	-	spoor, noord, gespan 18
BEL11.GAK.07	89	4	-	1254	spoor, noord, gespan 16
BEL09.GAK.A01	74	-	-	1229	blokkeel, zuid, gespan 11
BEL09.GAK.A02	48	K/S	-	-	blokkeel, zuid, gespan 8
BEL09.GAK.A03	74	K/S	-	1254	blokkeel, zuid, gespan 18
BEL09.GAK.A04	77	-	-	1208	blokkeel, zuid, gespan 26
BEL09.GAK.A05	67	K/S	-	-	blokkeel, noord, gespan 26
BEL09.GAK.A06	51	-	-	-	blokkeel, noord, gespan 15
BEL09.GAK.A07	82	K/S	-	1241	blokkeel, noord, gespan 14
BEL09.GAK.A08	83	K/S	-	1252	blokkeel, noord, gespan 8
BEL09.GAK.A09	51	-	-	1260	blokkeel, noord, gespan 5
BEL09.GAK.A10	90	-	-	1244	blokkeel, noord, gespan 4
BEL09.GAK.A11	120	-	-	1230	5de trekbalk vanaf westen (sporenpaar 25)
Zuidelijk transept					
BEL09.GAK.B01	46	11	-	-	1ste trekbalk vanaf noorden
BEL09.GAK.B02	33	-	-	-	stijl tussen 2de trekbalk en korbeel, west
BEL09.GAK.B03	-	-	-	-	blokkeel, west, gespan 17
BEL09.GAK.B04	-	-	-	-	blokkeel, oost, gespan 17
BEL09.GAK.B05	27	-	-	-	muurplaat, oost, ter hoogte van gespan 2
Koor					
BEL09.GAK.Co1	34	-	-	-	resterend stuk van de oude trekbalk, west
BEL09.GAK.Co2	-	-	-	-	blokkeel, noord, gespan 19
BEL09.GAK.Co3	33	17	-	-	blokkeel, noord, gespan 23

* K/S overgang tussen kernhout en spint.

deerd door schimmelaantasting. Bij 12 van de geselecteerde en bemonsterde onderdelen uit de kappen was spinthout nog deels aanwezig (fig. 8), maar een deel daarvan verbrokkelde tijdens het boren van de boorkernen. Daardoor komt de buitenste ring op de boorkern overeen met de overgang tussen kernhout en spinthout (K/S in tabel 1). Na het opmeten blijkt dat het aantal jaar-ringen per boorkern varieert van minder dan 40 tot 120. Meteen valt het op dat de langste reeksen steeds afkomstig zijn uit de kap van het middenschip.

Dertien opgemeten groeiringreeksen uit de kap van het middenschip zijn onderling te synchroniseren. Dit betekent dat de groeiringpatronen een duidelijke gelijkenis vertonen en

dat de jaarlijkse toe- of afname in de breedte van de groeiringen synchroon verloopt. Daardoor kunnen ze samengevoegd worden tot één middelcurve (label: BEL11.GSK.m1). Net als alle andere individuele groeiringreeksen werd deze middelcurve daarna vergeleken met absoluut gedateerde referentiekalenders uit België, Nederland, Duitsland en het noorden van Frankrijk. De middelcurve vertoont met een aantal van deze referentiekalenders een uitstekende overeenkomst (tabel 2). Hieruit blijkt dat de meest recente groeiring werd gevormd in 1266 AD. Dit is meteen ook de enige betrouwbare datering die werd gevonden. Alle andere individuele groeiringreeksen die niet zijn opgenomen in de middelcurve, en zeker die uit de kappen van het koor



FIG. 8 Blokkeel gezaagd uit een kwart van een stam. Nog slechts enkele spinthoutringen zijn aanwezig (witte pijl).
Sole piece sawn from a quarter of a stem. Only a few sapwood rings are preserved (white arrow).

en de dwarsarmen, konden niet gedateerd worden. De reden hiervoor moet onder meer worden gezocht bij de beperkte lengte van deze groeiringreeksen, die in de meeste gevallen minder dan 60 jaar (ringen) lang zijn, met een gemiddelde ringbreedte van 3,02 mm.

2.2.2 Interpretatie van de datering

De gedateerde groeiringreeksen komen allemaal uit de kap van het middenschip. Aan de hand van deze dendrochronologische dateringen willen we een zo goed mogelijke benadering krijgen van het tijdstip waarop de kap werd gebouwd. Daarvoor moet de einddatering van de middelcurve, 1266 AD, op een correcte manier geïnterpreteerd worden. Eerst wordt nagegaan in hoeverre deze einddatering overeenstemt met het jaar waarin de bomen werden geveld. Daartoe is het belangrijk na te gaan of en hoeveel spinthout werd opgemeten bij de gedateerde groeiringreeksen. Uit tabel 1 blijkt dat bij zes boorkernen de overgang tussen kern- en spinthout werd waargenomen en bij vier reeksen effectief een aantal spinthoutringen werd opgemeten. Restanten van de schors werden niet geobserveerd, waardoor we de veldatum niet exact kunnen bepalen. Er kan echter wel een schatting gemaakt worden op basis van het verwachte aantal spintringen. Bij eik is dat verwachte aantal sterk variabel, maar het volgt een klokvormige kansverdeling⁴⁸. Als we deze informatie koppelen aan het aantal spintringen dat werd opgemeten bij elke gedateerde groeiringreeks, dan kan hiermee het interval berekend worden waarbinnen de veldatum van de bomen valt (fig. 9)⁴⁹. Het Bayesiaanse model dat hiervoor werd opgebouwd geeft aan dat het bouwhout dat gebruikt werd bij het optrekken van de kap van het schip afkomstig is van bomen die gekapt werden tussen 1266

en 1271 AD. Vermoedelijk kan dit interval voor de veldatum ook geïnterpreteerd worden als de werkelijke constructiedatum voor de kap. Geïntegreerd bouwhistorisch en dendrochronologisch onderzoek toont immers aan dat voor bouwhout vaak 'groen' hout werd gebruikt⁵⁰. Dat is hout dat vrij snel na de kap in gebruik wordt genomen en daardoor nog niet volledig is gedroogd. Meestal verstreek er minder dan twee jaar tussen het vellen van een boom en het gebruik ervan als bouwhout⁵¹.

2.2.3 Waar komt het hout vandaan?

Naast een datering kan het dendrochronologisch onderzoek ook meer informatie geven over de herkomst van het hout⁵². Het oorsprongsgebied stemt immers niet noodzakelijk overeen met de onmiddellijke omgeving van het bouwterrein. Bouwhout werd immers vaak ingevoerd langs waterwegen, waardoor het oorsprongsgebied van het hout zich veel verder stroomopwaarts van de bouwplaats kan bevinden. Aangezien de referentiekalenders steeds zijn opgebouwd met hout uit één bepaalde regio, kan de gelijkenis met de opgemeten groeiringreeksen aangeven of het hout al dan niet uit de overeenstemmende regio afkomstig is. In tabel 2 is een overzicht te zien van de referentiekalenders waarmee de beste overeenkomst werd gevonden. Daarbij springen zowel de referentiekalenders uit de Maasvallei/Ardennen als de lokale referentiekalender voor Vlaanderen in het oog, met opvallend hoge correlatiewaarden (t -waarden en parallele variatie, %PV). De overeenkomst met referentiekalenders uit andere ons omringende regio's is beduidend lager. Het onderscheid tussen het zuiden van België en lokaal hout valt, louter gebaseerd op deze mathematische overeenkomst met de referentiekalenders, echter heel moeilijk te maken. Bij geïmporteerd hout verwacht

⁴⁸ Haneca *et al.* 2009; Haneca & Debonne 2012.

⁴⁹ Zie Debonne & Haneca 2011 en Haneca &

Debonne 2012 voor meer details over de gevolgde methodologie.

⁵⁰ Miles 2006; Hoffsummer 2007; Haneca 2010.

⁵¹ Miles 2006; de Vries 1994; Hollstein 1980, 35-38.

⁵² Eckstein & Wröbel 2007; Daly 2007.

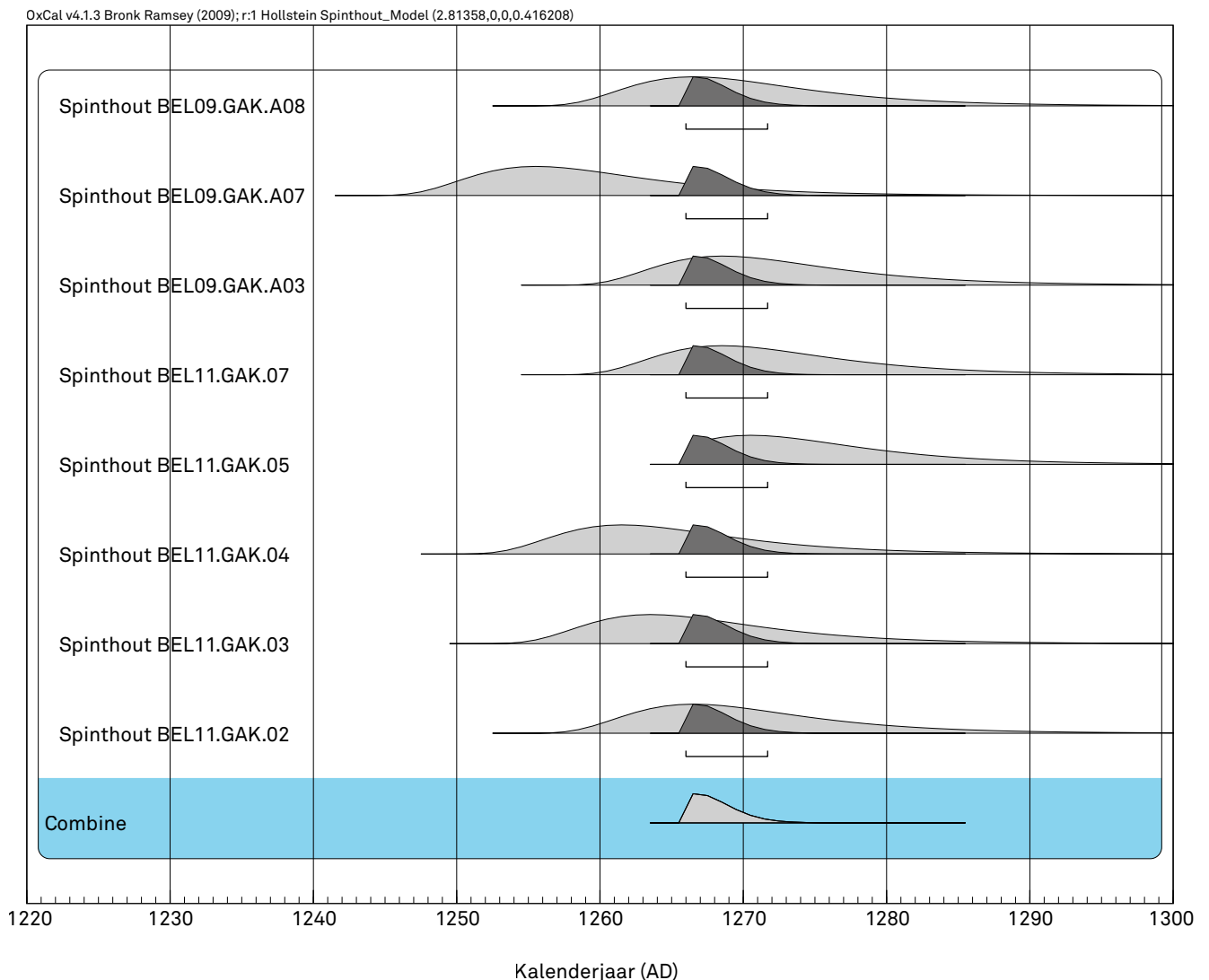


FIG. 9 Berekening van de veldatum door gebruik te maken van een Bayesiaans model waarin het aantal opgemeten spinhoutringen en de kansverdeling voor het aantal te verwachten spinhoutringen per gedateerde groeiringreeks is opgenomen. De veldatum voor de kap van het schip ligt volgens dit model tussen 1266 en 1271 A.D. (95,4% betrouwbaarheidsinterval).

Calculation of the felling date by implementing a Bayesian model in which the number of measured sapwood rings for each dated tree-ring series and the probability density function for the expected number of sapwood rings are taken into account. The felling date for the roof construction of the middle aisle is situated between 1266 and 1271 A.D. (95,4% confidence interval).

ten we echter nog een aantal kenmerken terug te vinden op het bouwhout, zoals handelsmerken⁵³ en vlotverbindingen⁵⁴. De eerste kunnen geïnterpreteerd worden als eigendomsmerken die werden aangebracht tijdens het verhandelen en vervoeren van het hout. De vlotverbindingen zijn opvallende perforaties in het hout die verband houden met het vloten van hout langs waterlopen. Doorheen deze ronde openingen werden touwen of wissel getrokken om balken samen te binden tot een vlot. Geen van beide werd echter waargenomen op de bouwelementen van de kappen. Mede door de hoge correlatie met de lokale referentiekalender voor Vlaanderen, doet dit ons vermoeden dat het hout

een lokale oorsprong heeft. Het hout voor de constructie van de kap van het middenschip werd dus ergens in de wijde omgeving van Belsele gekapt.

De afmetingen van de sporen, standzonen en hanenbalken verschillen nauwelijks binnen en tussen de kappen. Dat kan niet gezegd worden van de groeiringpatronen uit diezelfde kappen. Zo is er een duidelijk verschil tussen de groeiringreeksen uit het middenschip en die van de dwarsarmen en het koor. De groeiringen op het bouwhout uit de dwarsarmen en het koor zijn duidelijk breder ($1,23 \pm 0,50$ mm in het middenschip t.o.v. $3,02 \pm$

⁵³ Haslinghuis & Janse 2005; van Tussenbroek 2008; Hoffsummer 2009, 53-54.

⁵⁴ Hoffsummer 2009, fig. 20; Eissing 2009; Eissing & Dittmar 2011; Debonne & Haneca 2011.

TABEL 2

Datering van de middelcurve BEL11.GSK.m1, samengesteld met groeiringpatronen uit de kap van het schip, met referentiekalenders voor eikenhout. De overeenkomst is uitgedrukt met een t-waarde (t_{BP}) en het percentage aan parallel variatie (%PV). Het significantieniveau p van het %PV wordt aangegeven door *, ** of ***, resp. $p \leq 0.05$, $p \leq 0.01$, $p \leq 0.001$.

*Dating results for the mean curve BEL11.GSK.m1, composed of growth-ring patterns from the roof construction of the central aisle, with reference calendars for oak. The degree of similarity is expressed with a t-value (t_{BP}) and the percentage of parallel variation (%PV). The level of significance of the %PV is indicated by *, ** or ***, corresponding to $p \leq 0.05$, $p \leq 0.01$ or $p \leq 0.001$ respectively.*

Referentie-kalender	Auteur	Geografische spreiding	Datering	t_{BP}	%PV
Fl.medieval (808 - 1530 AD)	K. Haneca, ongepubliceerde referentiekalender	België, Vlaanderen	1111 - 1266 AD	9,5	74***
BE.Meuse5 (672 - 1991 AD)	Hoffsummer (1995)	België, Maasvallei	id.	10,8	70***
BE.Arden4 (672 - 1714 AD)	Hoffsummer (1995)	België, bouwhout uit de Ardennen	id.	11,4	71***
BE.Ypres (1132 - 1321 AD)	Haneca et al. (2006)	België, archeologisch hout uit Ieper	id.	9,5	76***
DE.Holl80 (400 BC - 1975 AD)	Hollstein (1980)	Duitsland, Centraal en Zuid Duitsland	id.	5,2	65***
FR.Meuse (918 - 1818 AD)	W. Tegel, ongepubliceerde referentiekalender	Frankrijk, Maasvallei	id.	7,1	71***
FR.BasPar8 (348 BC - 1994 AD)	Bernard (1998)	Frankrijk, bekken van Parijs	id.	6,0	60***

0,96 mm in de dwarsarmen en het koor) en vertonen meer variatie (fig. 7). Daardoor hebben de boorkernen uit het koor en de dwarsarmen ook minder groeiringen en zijn de groeiringreeksen dus ook beduidend korter. Dit wijst erop dat het hout afkomstig is van bomen die groeiden in een totaal verschillend type bos. De smalle ringen en het uniforme groeiringpatroon, zoals we die aantreffen in de kap van het middenschip, suggereren dat deze bomen relatief traag groeiden (de diameter neem elk jaar relatief weinig toe) in een gesloten, dicht bos, met weinig verstoring. Het hout met de bredere groeiringen en meer variatie stemt dan weer overeen met een standplaats met open structuur en veel licht waar eiken een meer uitgesproken diametergroei kennen. Dit wijst op een (regenererend?) bos waar er een duidelijke invloed is geweest van de mens. Weliswaar betreft het hier nog steeds eikenhout, maar het assortiment is duidelijk anders en van mindere kwaliteit. Voor de bouw van de meer recente kappen van het koor en de dwarsarmen werden duidelijk beduidend jongere bomen geveld.

Algemeen wordt aangenomen dat Vlaanderen aan het eind van de 13de eeuw een bijzonder laag percentage aan beboste oppervlakte had⁵⁵. De grote ontginningen onder invloed van de sterk toenemende bevolking reduceerden het bosareaal aanzienlijk. In Belsele was het bij de bouw van het schip van de kerk in de 13de eeuw blijkbaar nog geen probleem om geschikt bouwhout te vinden. Het groeiringpatroon wijst erop dat het hout uit een dicht, gesloten bos werd gehaald. Enkele kilometers ten noorden van Belsele waren er nog restanten van het *Koningsforeest*, dat tijdens de vroege middeleeuwen bijna het volledige Waasland bedekte, en ten zuiden was er het *Bos tussen Schelde en Durme*.

Op beide locaties was hoogstwaarschijnlijk nog een aanzienlijke voorraad aan eikenhout beschikbaar in bos dat aan bovenstaand criterium voldoet. Bij de uitbreiding van de kerk met dwarsarmen en een nieuw koor in de 15de eeuw werd duidelijk een ander type hout gebruikt, vermoedelijk ook afkomstig uit dezelfde regio, maar niet uit een gelijkaardig type bos. Gebaseerd op de groeiringpatronen kan men niet langer aannemen dat er bomen werden geveld uit een gesloten bos. Was dergelijk bos ondertussen een zeldzaamheid in deze regio, onder invloed van systematische (bos)ontginningen⁵⁶? Of was de toegang tot deze bossen ontzegd? Het Land van Waas was inderdaad een van de laatste regio's in Vlaanderen die op grootschalige wijze werd geëxploiteerd, onder invloed van de sterk stijgende bevolkingsdruk in de steden.

2.2.4 Met bijl en zaag

Eén kenmerk hebben de houten elementen uit de kappen van het schip enerzijds, en koor en transept anderzijds, wel gemeen. Op beide zijn nog steeds duidelijk leesbare bewerkingssporen terug te vinden. Ze getuigen van het verspanen van een boomstam naar een balk. Daarbij hebben de gebruikte gereedschappen sporen achtergelaten in het hout. Zo is op sommige onderdelen nog steeds te zien dat de stammen werden bewerkt met een beslagbijl (gekantrecht) en daarna in de lengte verzaagd met een raamzaag⁵⁷ (fig. 10). Deze types van bewerkingssporen zijn terug te vinden in zowel de kap van het schip als die van het transept en het koor. Er valt hier dus geen evolutie op te merken in de gereedschappen die gebruikt werden, laat staan dat de sporen die ze achterlieten op het hout een datering kunnen opleveren.

55 Tack et al. 1993.

56 Van den Bremt & De Meirman 2010.

57 Janse 1998.



FIG. 10 Keper in de dakkap van het koor met bewerkingsporen van een raamzaag en dissel.

Rafter showing traces of a frame saw and adze.

3 De noordelijke langsmuur van het middenschip

3.1 Beschrijving

Boven de gewelven onthult zich de meerfasige bouwgeschiedenis van het middenschip. In de langsmuren zijn vier paar gedichte spitsboogvensters van de oorspronkelijke lichtbeuk zichtbaar (fig. 4). Verborgen achter het gewelf van de dwarsarmen is van de oostelijke vensters enkel de top van de spitsboog herkenbaar. Twee rijen van bakstenen met afgeschuinde koppen vormen de geprofileerde dagkanten van de vensters. De kroonlijst van de langsmuren bestaat uit twee uitkragende baksteenlagen op bakstenen met een rondstaafprofiel (fig. 11). De profielbakstenen zijn op hun strek in de muur verwerkt, wat een decoratieve opeenvolging van rondstaafprofielen oplevert. In de oostmuur

van het middenschip, waar in de 15de eeuw het koor tegenaan werd gebouwd, is metselwerk in Doornikse kalksteen zichtbaar, een vermoed restant van het romaanse schip. De verhoging in baksteen erboven is versierd met een fries van rechtop geplaatste baksteenkoppen.

De oorspronkelijke toestand van de lichtbeuk en haar latere aanpassingen zijn het best te zien aan de vroegere buitenzijde van de noordelijke langsmuur, boven het gewelf van de noordelijke zijbeuk (fig. 12). De bouwmaterialen zijn er grotendeels zichtbaar, in tegenstelling tot de volledig bepleisterde binnenzijde van de muur. De zuidelijke langsmuur is zowel aan de binnenzijde als aan de vroegere buitenzijde volledig bepleisterd.

Onderaan, tot ongeveer 1,7 m boven het gewelf van de noordbeuk, tekenen zich de vermeende resten af van het romaanse middenschip. Het ruwe metselwerk bestaat uit hergebruikte Romeinse *tegulae*, stukken Doornikse kalksteen en enkele donkerbruine brokken moeras- of ijzeroer⁵⁸. De mortel van het grove voegwerk is gedeeltelijk over de bouwmaterialen uitgestreken. Boven deze zone bevindt zich het baksteenmetselwerk met de gedichte bovenlichten. De bakstenen hebben een egaal oranje kleur en een compacte, fijnkorrelige textuur, hoewel vaak met inclusie van keitjes. De grondstof van de bakstenen is Boomse of Rupeliaanse klei, overvloedig aanwezig in de nabije omgeving⁵⁹. Ontginbare reserves bevonden zich tot in de 20ste eeuw langs de Schelde in Tielrode, Steendorp en Kruikeke, en noordwestelijker in Sint-Niklaas, Kemzeke en Stekene⁶⁰. De bakstenen in het kerkschip van Belsele zijn mogelijk afkomstig uit Stekene, waar productie van bouwceramiek al sinds de 13de eeuw is geattesteerd in geschreven bronnen⁶¹.

De bakstenen van de verhoging van de lichtbeuk meten 29-29,5-30 x 13-14-14,5 x 6-6,5 cm. Het metselverband is onregelmatig. Een neiging tot afwisselend koppen- en strekkenlagen (staand verband) is her en der wel merkbaar, maar nergens wordt een volledige rij koppen of strekken aangehouden. De tienlagenmaat bedraagt 72,5 tot 73,5 cm, soms met een uitschieter tot 77 cm. De dikte van de lintvoegen is eerder onregelmatig, gaande van 1,8 à 2 cm tot slechts 1 cm. Hier en daar is de mortel uitgestreken op de randen van de bakstenen.

De vensteropeningen werden tijdens de overwelling van het middenschip in de jaren 1550-1560 gedicht met smalle bakstenen van 23-24 x 11-12 x 3,5 cm. In het tweede westelijke venster werden ook bakstenen van 25 x ? x 5 cm verwerkt. Het metselwerk in de vensteropeningen is uitgevoerd in verschillende verbanden: onregelmatig verband, halfsteens verband en een naar kruisverband neigende afwisseling van koppen- en strekkenlagen.

Onder de kroonlijst, rond de gedichte vensters en op enkele plaatsen ook op het metselwerk van het romaanse schip, bleven resten van een witte bepleistering met ingesneden schijnvoegen bewaard (fig. 13). Boven de vensters volgen de schijnvoegen de ronding van de spitsboog. Deze bepleistering is de eerste en dus oudste afwerklaag op het bakstenen metselwerk van de lichtbeuk. Het gaat ongetwijfeld om de oorspronkelijke buitenafwerking van de bakstenen lichtbeuk.

⁵⁸ Demey 1985, 26. 'IJzeroer is het resultaat van een bodenvormingsproces in associatie met veenlagen [...]'. Het gesteente komt vooral voor in

vochtige beekvalleien (Dusar *et al.* 2009, 353-356).

⁵⁹ Vandervee 1953, 53-72; Gullentops & Wouters 1996, 40-43.

⁶⁰ Thuisbaert 1913, 288-289.

⁶¹ Debonne & Oost 2008, 281-282; Thiron 2010, 42-48.



FIG. 11 De noordelijke langsmuur van het middenschip gezien naar het westen, van op het gewelf van de noordelijke zijbeuk.
The northern longitudinal wall of the middle aisle looking west, seen from the vault of the northern side aisle.

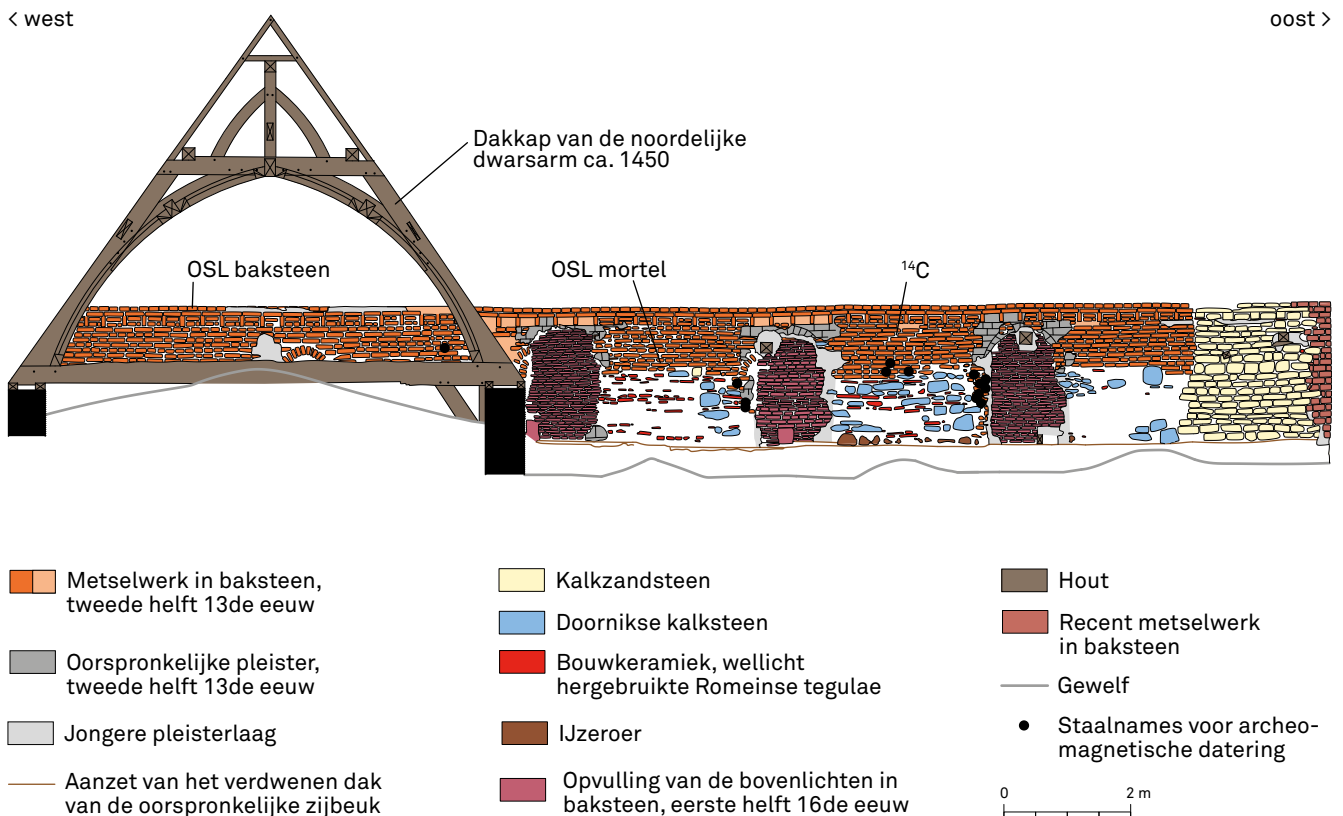


FIG. 12 Gedetailleerde tekening van de noordelijke langsmuur van het middenschip t.h.v. de gedichte bovenlichten, met aanduiding van de staalnames voor ¹⁴C- en OSL-datering van mortel, en OSL- en AM-datering van bakstenen.
Scaled drawing of the northern longitudinal wall of the middle aisle at clerestory level, with the location of samples taken for ¹⁴C and OSL dating of mortar and OSL and AM dating of bricks.



FIG. 13 Resten van de oorspronkelijke afwerking van de noordelijke langsmuur van het middenschip: wit pleister met ingesneden imitatievoegen.

Remains of the original finish of the northern longitudinal wall: white plaster with incised false joints.

3.2 Een problematische datering van het baksteenmetselwerk

Hoewel traditioneel gedateerd in het tweede kwart van de 13de eeuw, laten de materiaal- en bouwtechnische aspecten van het baksteenmetselwerk een dergelijk nauwe datering niet toe. De datering in het tweede kwart van de 13de eeuw van de profielbakstenen in de kroonlijst, op basis van de vondst van dezelfde profielbakstenen op de site van de abdij van Boudelo⁶², is niet houdbaar. Niets bevestigt immers een datering van de bakstenen met een rondstaafprofiel uit Boudelo in 1223. De aangehaalde oorkonde uit dat jaar vermeldt *stricto sensu* de schenking van gronden en nog geen daadwerkelijke baksteenproductie. Ook de archeologische context waarin de profielbakstenen van Boudelo werden aangetroffen, laat een dergelijk scherpe datering

niet toe⁶³. Het rondstaafprofiel ten slotte is een dermate courante vorm dat hoogstens kan worden besloten tot een ruime datering in de 13de eeuw.

Ook uit de afmetingen van de bakstenen kan geen datering met de precisie van een kwarteeuw worden afgeleid. Voorlopig gelden in het Waasland grote bakstenen van 29-30 x 13-14 x 6-6,5 cm als 13de-eeuws zonder meer⁶⁴. De afwisseling tussen koppen- en strekkenlagen (staand verband) die zich op enkele plaatsen in het metselwerk voordoet, pleit misschien voor een datering na het midden van de 13de eeuw⁶⁵. Dat is alvast niet in tegenpraak met de dendrochronologische datering van de sporenkap in 1266-1271.

Enkel natuurwetenschappelijke dateringen van de bouwmaterialen zelf kunnen mogelijk een meer precieze en betrouwbare datering van de lichtbeuk opleveren, en al dan niet de gelijktijdigheid met de dakkap erboven bevestigen. Een staal uit de kalkmortel van het bakstenen metselwerk werd onderworpen aan een ¹⁴C-datering. Uit de bakstenen werden 22 monsters gelicht voor een archeomagnetische analyse en één monster voor een OSL-datering. Ten slotte werd een stuk mortel onderzocht op de mogelijkheid tot OSL-datering.

3.3 ¹⁴C-datering van de kalkmortel

3.3.1 Algemeen principe

De radiokoolstofdateringsmethode steunt op twee pijlers. Ten eerste is er het radioactieve verval dat met een constante snelheid verloopt. Dit wil zeggen dat van een gegeven hoeveelheid radioactieve koolstof (voorgesteld door het symbool ¹⁴C) de helft door het radioactieve verval verdwijnt na 5.730 jaar. Dat betekent dat na 5.730 jaar nog de helft overblijft, na 11.460 jaar nog een vierde enzovoort. Ten tweede wordt ¹⁴C in de atmosfeer aangemaakt en komt het door fotosynthese in de koolstofcyclus terecht (fig. 14). Met andere woorden, alle organismen die rechtstreeks of onrechtstreeks hun koolstof uit de atmosfeer betrekken, kunnen met de methode gedateerd worden. Eenvoudig gesteld bestaat de dateringsmethode uit het meten van de hoeveelheid ¹⁴C die nog aanwezig is, de vergelijking van dit resultaat met de initiële hoeveelheid ¹⁴C en de berekening daaruit, met behulp van de halfwaardetijd, van de ouderdom van dit systeem. De radiokoolstofouderdom, uitgedrukt in BP (*before present*), is geen kalenderouderdom. Om die te verkrijgen moet de datering gekalibreerd worden⁶⁶.

3.3.2 Dateren van mortel

Voor de bouw van historische gebouwen werden doorgaans niet-hydraulische of slechts gedeeltelijk hydraulische mortels gebruikt als bindmiddel tussen de natuur- of bakstenen bouwelementen. In principe wordt een niet-hydraulische mortel als volgt bereid (fig. 15). Kalkrots of schelpen, al dan niet in poeder, wordt op hoge temperatuur gebracht waardoor het calciumcarbonaat (CaCO₃) ontbindt tot calciumoxide (CaO) of ongebluste kalk (reactie 1). Aan de ongebluste kalk wordt water toegevoegd zodat calciumhydroxide (Ca(OH)₂) of gebluste kalk ontstaat

⁶² Demey 1985, 49-50.

⁶³ De Belie 1997, 180-185. In de beschrijvingen van de opgegraven middeleeuwse bouwresten van de Boudeloabdij worden enkel baksteenformaten

vermeld, geen baksteenvormen.

⁶⁴ Van Hove 1994, 140-141, 196.

⁶⁵ In Brugge en de regio Veurne verschijnt het staand verband in het laatste kwart van de 13de

eeuw. Wets 2008, 150; Lehouck 2008, 216-218.

⁶⁶ Voor verdere informatie zie Van Strydonck 1992 & Van Strydonck *et al.* 1999.

FIG. 14 De koolstofcyclus.
The radiocarbon cycle.

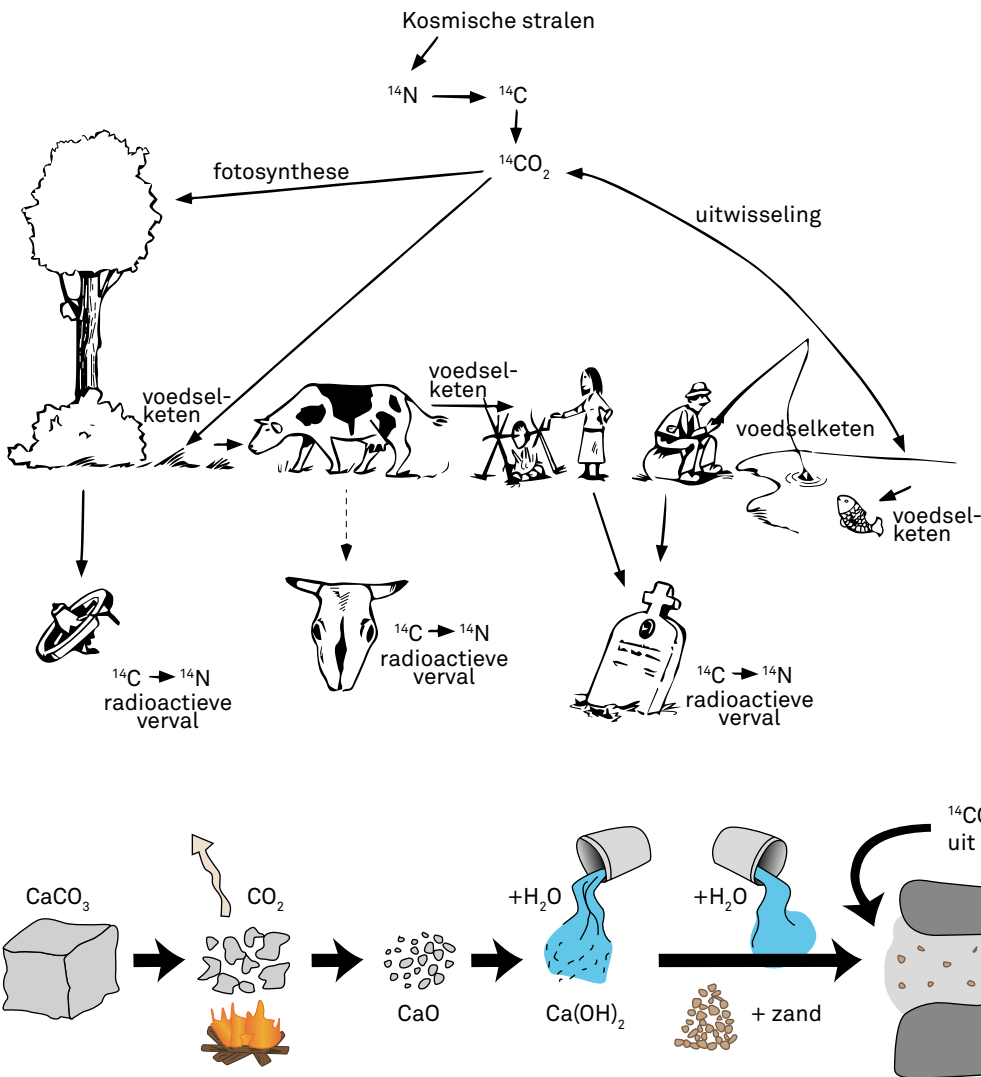
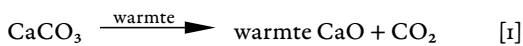


FIG. 15 Vereenvoudigd schema van kalkmortelproductie (naar Heinemeier *et al.* 2010, fig. 1).
Simplified scheme of the manufacture of lime mortar (after Heinemeier *et al.* 2010, fig. 1).

(reactie 2). De gebluste kalk zal zich binden met koolstofdioxide uit de lucht en vormt opnieuw calciumcarbonaat (reactie 3). Dit calciumcarbonaat, vermengd met een vulmiddel (zoals bv. zand), vormt uiteindelijk de uitgeharde mortel tussen de natuur- of bakstenen.



Uit reactie 3 blijkt duidelijk dat er rechtstreeks CO_2 uit de lucht ingebouwd wordt in de calciumcarbonaatmoleculen. Met andere woorden, de ^{14}C -concentratie in de mortel weerspiegelt de ^{14}C -

concentratie van de atmosfeer ten tijde van de bouw van het metselwerk. Na deze reactie start het radioactieve verval van de koolstofisotopen. In principe is mortel dus even goed te dateren met de radiokoolstofmethode als een stuk hout of een dierlijk of menselijk bot. In tegenstelling tot niet-hydraulische mortels harden hydraulische mortels uit door de blootstelling aan water. Hierbij komt geen atmosferisch CO_2 te pas. Mortels kunnen ook bestaan uit een mengeling van hydraulische en niet-hydraulische componenten. Een deel van de mortel hardt dan uit met water, het andere deel met atmosferisch CO_2 . Het hydraulische gedeelte oefent hierbij geen invloed uit op het niet-hydraulische gedeelte, dat dus niet minder geschikt is voor een ^{14}C -datering. Dit is het geval voor de mortel van Belsele, die door het Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium (KIK) kon worden geïdentificeerd als een licht hydraulische mortel⁶⁷.

3.3.3 De zuiverheid van de mortel

Hoewel het dateren van mortelspecie in principe heel eenvoudig is, blijkt het in de realiteit soms problematisch tot zeer problematisch. Hiervoor zijn verschillende redenen.

Ten eerste wordt mortelspecie aangebracht in een relatief dunne laag tussen twee vrijwel ondoorlaatbare lagen steen. Dat wil zeggen dat het CO_2 uit de lucht langs een klein oppervlak (de voeg) moet diffunderen in de mortel. Dit geeft aanleiding tot diffusieprocessen in de mortel. In een laboratoriumomgeving werd dit proces gesimuleerd door glazen tubes te vullen met gebluste kalk gemengd met carbonaatvrij zand (i.e. zonder 'fossiele' koolstof) als vulmiddel (fig. 16). Deze glazen tubes zijn weliswaar absoluut gasdicht in tegenstelling tot baksteen. Ze werden gedurende 12, 24 en 36 maanden in openlucht geplaatst⁶⁸. Uit deze tests bleek dat het vrij lang duurt vooraleer alle $\text{Ca}(\text{OH})_2$ omgezet is tot CaCO_3 (fig. 17). Dit impliceert dat bij heel dikke muren er niet alleen een groot tijdsverschil, soms zelfs meerdere jaren, kan bestaan tussen het voegen met de natte mortelspecie en de uiteindelijke omzetting ervan tot carbonaat, maar dat zelfs door de uitharding van de mortel aan het oppervlak het CO_2 uit de lucht niet kan doordringen tot diep in de mortel, waardoor $\text{Ca}(\text{OH})_2$ achterblijft in het binnenste van de mortelvoeg.

Dit laatste kan getest worden door met fenolftaleïne de zuurtegraad (pH) van de mortel te evalueren. Indien nog een aanzienlijke hoeveelheid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aanwezig is, zal deze test een alkalische (basische) reactie geven. Uit de praktijk blijkt echter dat dit fenomeen zich zelden stelt. De omzetting van de gebluste kalk tot CaCO_3 is bij metselwerk immers vaak vrij volledig, in tegenstelling tot wat de proefopzet deed vermoeden. Toch wordt bij elke mortelanalyse deze fenolftaleïne-test uitgevoerd om de aanwezigheid van ongebluste kalk ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) uit te sluiten.

Een tweede voorwaarde voor de datering van mortel is dat er enkel atmosferisch CO_2 in het carbonaat aanwezig mag zijn. Dat wil zeggen dat reactie [1] volledig moet zijn doorgevoerd. Zo niet blijft er fossiel rotscarbonaat in de mortel achter zodat de datering een te oud resultaat zal opleveren. In de praktijk is



FIG. 16 Glazen tubes gevuld met een mengsel van gebluste kalk en carbonaatvrij zand.
Glass tubes filled with a mixture of lime putty and carbonate free sand.

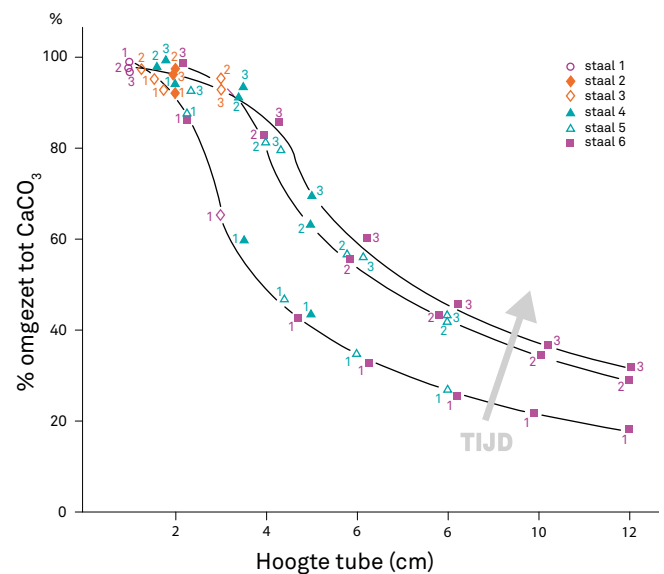


FIG. 17 Evolutie van de carbonaatvorming in gevulde glazen tubes.
Evolution of the carbonation process in the filled glass tubes.

reactie [1] haast nooit volledig. Er blijft dus altijd wat geologisch carbonaat in de mortel. Onderzoek heeft echter uitgewezen dat het fossiele rotscarbonaat een hardere structuur vertoont dan het antropogeen gevormde carbonaat (fig. 18)⁶⁹. In het laboratorium zal men dit verschil in hardheid benutten om beide fracties te scheiden (zie verder).

Problematisch is ook het gebruik van bepaalde toevoegstoffen. Net als bij de vervaardiging van aardewerk worden er toevoegstoffen onder de specie gemengd om krimp tegen te gaan, maar ook om de mechanische eigenschappen van het product te verbeteren. Meestal gaat het om zand. Als dit zand carbonaatvrij is, is er uiteraard geen probleem, maar vele zanden bevatten carbonaathoudende producten van geologische oorsprong (vb. Limburgse mergel). Ook deze zullen het resultaat van de datering beïnvloeden. Meestal zijn ze ook in grote hoeveelheden aanwezig waardoor de scheidingstechniek niet meer effectief wordt. Indien carbonaathoudende toevoegstoffen in grote hoeveelheden aanwezig zijn, vormen ze meestal het grootste probleem om een goede datering te bekomen. Met de huidige stand van het onderzoek moeten zulke mortels dan ook als niet-dateerbaar beschouwd worden.

Ten slotte moet nog vermeld worden dat in de loop der tijden het morteloppervlak kan verweren onder invloed van de luchtvochtigheid. Hierdoor kan herkristallisatie optreden met uitwisseling van CO_2 tussen de kalkmortel en de lucht. Dit geeft aanleiding tot een zeer harde carbonaatfractie met een ouderdom die beduidend jonger is dan de archeologische gebeurtenis. Dit komt niet zo veel voor bij mortels, maar wel bij begravingssituaties in ongebluste kalk⁷⁰. Het oppervlak dat blootgesteld staat aan de lucht en de vochtigheid is hier zeer groot.

⁶⁸ Van Strydonck *et al.* 1989.

⁶⁹ Heinemeier *et al.* 2010; Van Strydonck *et al.*

2011; De Mulder *et al.* 2014.

⁷⁰ Van Strydonck *et al.* 2011.

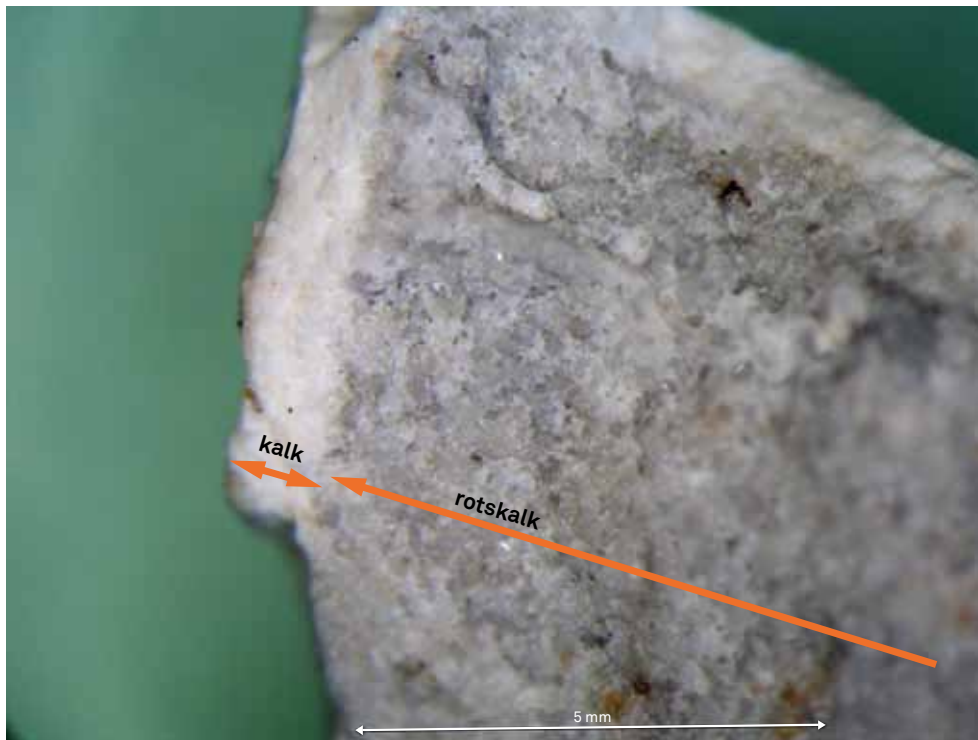


FIG. 18 Brokje kalkrots waarvan het oppervlak door hitte omgezet is tot CaO en later opnieuw tot CaCO₃ (wit gedeelte). Het witte gedeelte heeft fijnere kristallen dan het grijze gedeelte.

Piece of limestone of which the surface was transformed into CaO by heating, and subsequently converted into CaCO₃ (white colored part). The whiter part has finer crystals compared to the grey area.

3.3.4 Preparatietechniek en analyse

Er werd een staal genomen van de mortel na verwijdering van het oppervlak. Eerst werd er op het staal van Belsele een fenolftaleïne-test uitgevoerd, die negatief was. Dit betekent dat in het staal de ongebluste kalk vrijwel volledig werd omgezet tot calciumcarbonaat tijdens het uitharden van de mortel. Daarna werd het gezeefd op een mechanisch schudtoestel gedurende 30 minuten. Van de 27,12 g bleven op de verscheidene zeefniveaus de volgende hoeveelheden achter (fig. 19):

- 1-op zeef 0,18 mm: 13,15 g
- 2-op zeef 0,10 mm: 9,09 g
- 3-op zeef 0,075 mm: 2,98 g
- 4-op zeef 0,038 mm: 1,39 g
- 5-bodem: 0,51 g

Enkel het materiaal op zeef 4 werd geselecteerd voor analyse. Onderzoek heeft aangetoond dat deze fractie de minste contaminatie bevat in de vorm van fossiel carbonaat.

Uit de kalkmortel werd CO₂ geëxtraheerd gebruikmakend van de volgende titratiemethode, ontwikkeld in het KIK (fig. 20). Een monster wordt samen met ontgast gedemineraliseerd water in een reactietube gebracht en vacuüm gezogen. Met een magnetische roerder wordt de mortel in suspensie gehouden. Een op voorhand berekende hoeveelheid zuur (HCl 4%) wordt hieraan toegevoegd en het vrijgekomen CO₂ wordt opgevangen. Deze procedure wordt herhaald tot alle carbonaat weg is gereageerd. Op die manier worden een aantal opeenvolgende fracties gerecupereerd. In de eerste fractie zal het zuur hoofdzakelijk reageren met de zachte, antropogene kalk. Dit is het CaCO₃ dat ontstaan

is bij het uitharden van de ongebluste kalk. Bij de daaropvolgende fracties zal ook de hardere, geologische kalk meer beginnen reageren met het zuur. Het CO₂-gas van de opeenvolgende fracties wordt dan omgezet tot grafiet⁷¹ en gemeten in een deeltjesversneller (Accelerator Mass Spectrometry, AMS)⁷².

3.3.5 Resultaten

Omdat het HCl in de zuurreactie preferentieel, maar niet exclusief, met het antropogeen carbonaat reageert, zal er ook in de eerste fractie een weinig geologisch carbonaat aanwezig zijn. De hypothese is dat, bij het uitzetten van de radiokoolstofouderdom van elke fractie in een grafiek, een extrapolatie naar het 0-punt op de abscis (de X-as) het beste resultaat weergeeft. Dit betekent dat bij de radiokoolstofouderdom van de opeenvolgende fracties de best passende functie wordt berekend. De extrapolatie van deze functie naar het nulpunt ($x = 0$), geeft de meest betrouwbare inschatting van de radiokoolstofouderdom van de mortel (fig. 21, tabel 3).

In dit geval levert dit een radiokoolstofouderdom van 715 ± 20 BP op voor de mortel. Na kalibratie (fig. 22) komt dit overeen met een kalenderouderdom begrepen tussen 1263 en 1295 (95% waarschijnlijkheid). De dendrochronologische datering (tussen 1266-1271) valt binnen dit interval. Deze onafhankelijke datering van het metselwerk toont aan dat de dakkap en de onderliggende muur inderdaad gelijktijdig zijn.

Indien we aannemen dat de consensuswaarde ook de reële ouderdom van de mortel weergeeft dan kunnen we de hoeveelheid fossiel/geologisch carbonaat in het staal berekenen. Die bedraagt in dit geval slechts 0,53%, wat vrij laag is.

⁷¹ Van Strydonck & van der Borg 1991.

⁷² Nadeau et al. 1998.

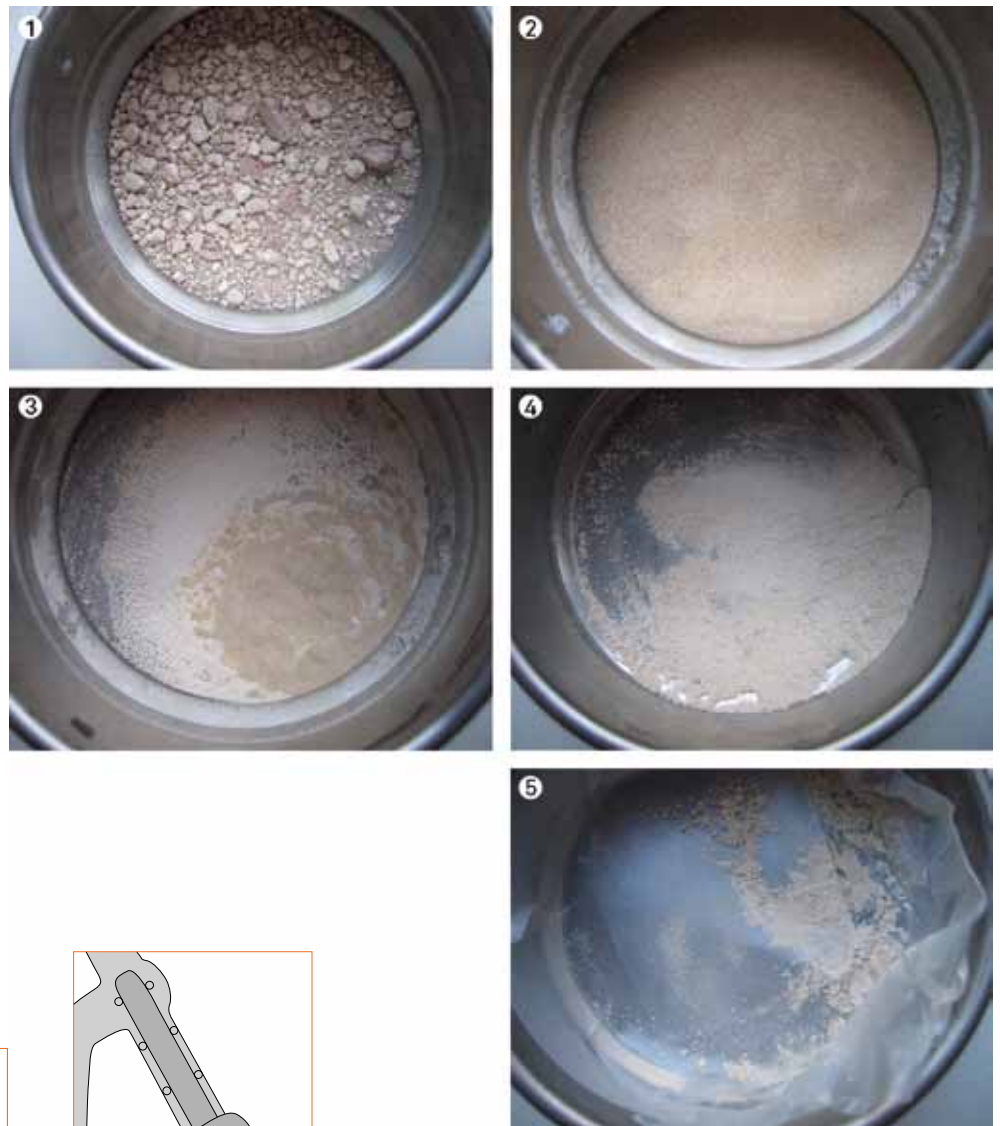


FIG. 19 De vijf zeeffracties.
The five fractions of the sieved residue.

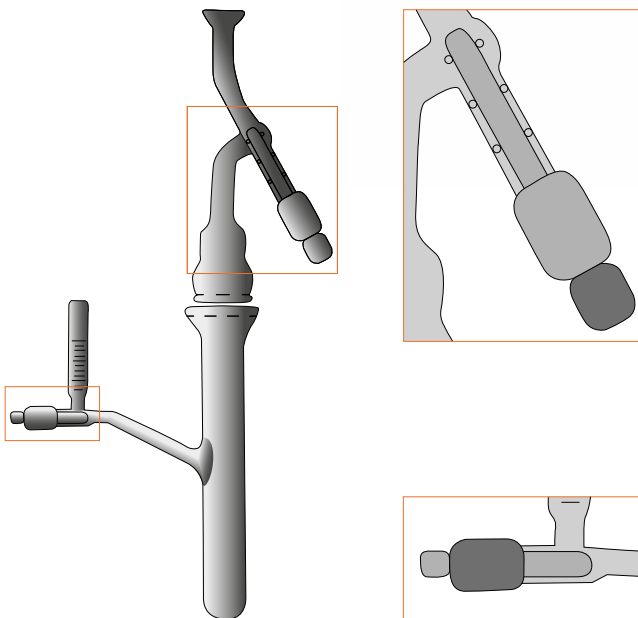


FIG. 20 De reactor voor de titratiemethode met bovenaan de verbinding naar de vacuümlijn en links de toevoer voor het zuur. Het mortelmonster (ca. 120 mg) bevindt zich onderaan samen met een hoeveelheid water en een magnetische roerder.

The reactor for the titration method, with a connection to the vacuum line on top and an inlet for the acid on the left. The mortar sample (ca. 120 mg) is located at the bottom, with water and a magnetic stirrer.

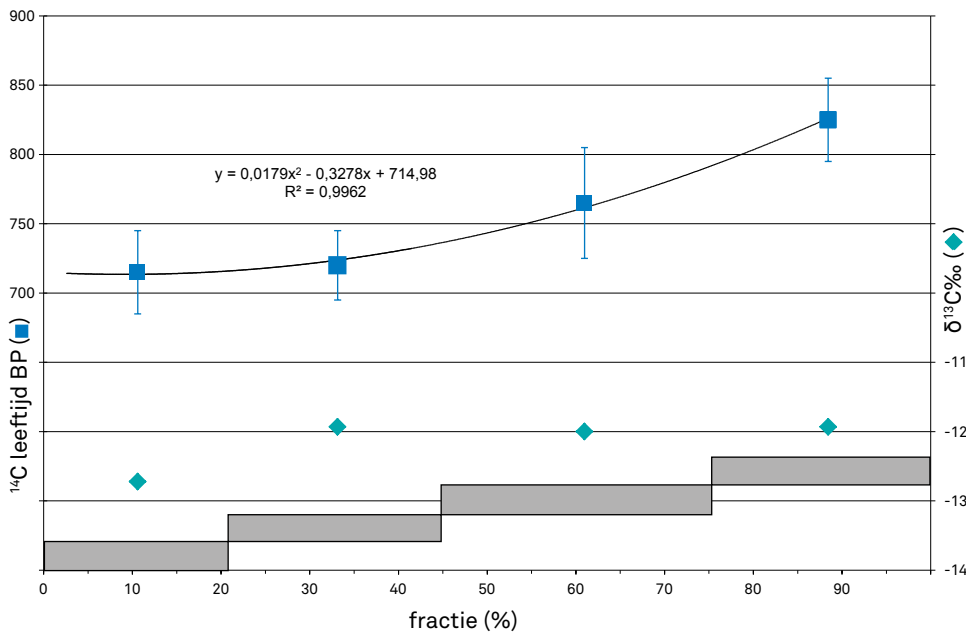


FIG. 21 Van de radiokoolstofouderdom (‰) van de verschillende fracties werd de best passende functie berekend (stippellijn). De extrapolatie van deze functie naar het nulpunt ($x = 0$), geeft de meest betrouwbare inschatting van de radiokoolstofleeftijd van de mortel. In dit geval is dat $y = 714.98$ BP. De stabiele isotope gegevens (u) bevestigen dat het gehalte aan fossiel carbonaat zeer laag is en dat er haast geen kinetische effecten zijn opgetreden tijdens de CO_2 -absorptiereactie.

A mathematical function is fitted to the radiocarbon ages (‰) of the different fractions (dotted line). The extrapolation of this function to the Y-axis ($X = 0$) gives us the most feasible estimate of the radiocarbon age of the mortar. In this case, $y = 714.98$ BP. The stable isotope data (u) confirm that the fossil carbonate content is very low and that there is almost no kinetic effect during the CO_2 absorption reaction.

TABEL 3

resultaten van de radiokoolstofanalyse op de vier fracties van de mortel van Belsele.

Results of the radiocarbon measurements on the four fractions of mortar from Belsele.

Fractie	% totaal	Ouderdom (BP)	$\delta^{13}\text{C}$	Lab ref.
1	21,21	715 ± 30	-12,75	KIA-43617
2	23,86	720 ± 25	-11,93	KIA-43618
3	31,81	765 ± 40	-12,00	KIA-43619
4	23,12	825 ± 30	-11,93	KIA-43620

3.4 Archeomagnetische analyse van baksteen

3.4.1 Algemeen principe

Het hoofddoel van een archeomagnetisch onderzoek is het bepalen van de richting en intensiteit van het aardmagnetisch veld (AMV) in het verleden op basis van de thermoremanente magnetisatie van *in situ* verbrande materialen⁷³. Bepaalde mineralen hebben immers de eigenschap om na verhitting het AMV te regis-

treren en vast te houden onder de vorm van een achterblijvende ('remanente') magnetisatie. Deze informatie die in dergelijke mineralen is vastgelegd, is in de geofysica van belang om een betere kennis te verkrijgen van de eigenschappen van het AMV in het verleden en van de processen die plaatsvinden in de vloeibare buitenkern van de aarde waar het veld wordt opgewekt. Omgekeerd, wanneer men de tijdsveranderingen van het AMV kent voor een bepaald gebied, kan men deze kennis gebruiken om verbrande materialen uit dat gebied te dateren; men spreekt in dit geval van een archeomagnetische datering⁷⁴.

Het AMV verandert met de plaats en in de tijd en kan voorgesteld worden door een vector. De richting van het veld op een bepaalde plaats kan men vastleggen door twee hoeken: de declinatie D en de inclinatie I (fig. 23a-b). De declinatie D is de hoek in het horizontale vlak tussen het geografische noorden en het magnetische noorden (fig. 23b) en wordt gerekend van 0 tot $\pm 180^\circ$, naargelang het magnetische noorden zich ten oosten (+) of ten westen (-) van het ware geografische noorden bevindt. De inclinatie I is de verticale hoek tussen het magnetisch veld en het lokale horizontale vlak. Het AMV is dus volledig bepaald op een gegeven tijdstip in een gegeven plaats wanneer men de drie onafhankelijke magnetische elementen D, I en F kent, waarbij F de intensiteit of amplitude van het veld voorstelt.

⁷³ Aitken 1974; Thellier 1981.

⁷⁴ Le Goff *et al.* 2002.

FIG. 22 Kalibratie van de consensuswaarde (715 ± 20 BP). Dit komt overeen met een datering tussen 1260 en 1295 A.D. (95.4% betrouwbaarheidsinterval). *Calibration of the consensus value (715 ± 20 BP). This gives us a calendar age between 1260 and 1295 A.D. (95.4% confidence interval).*

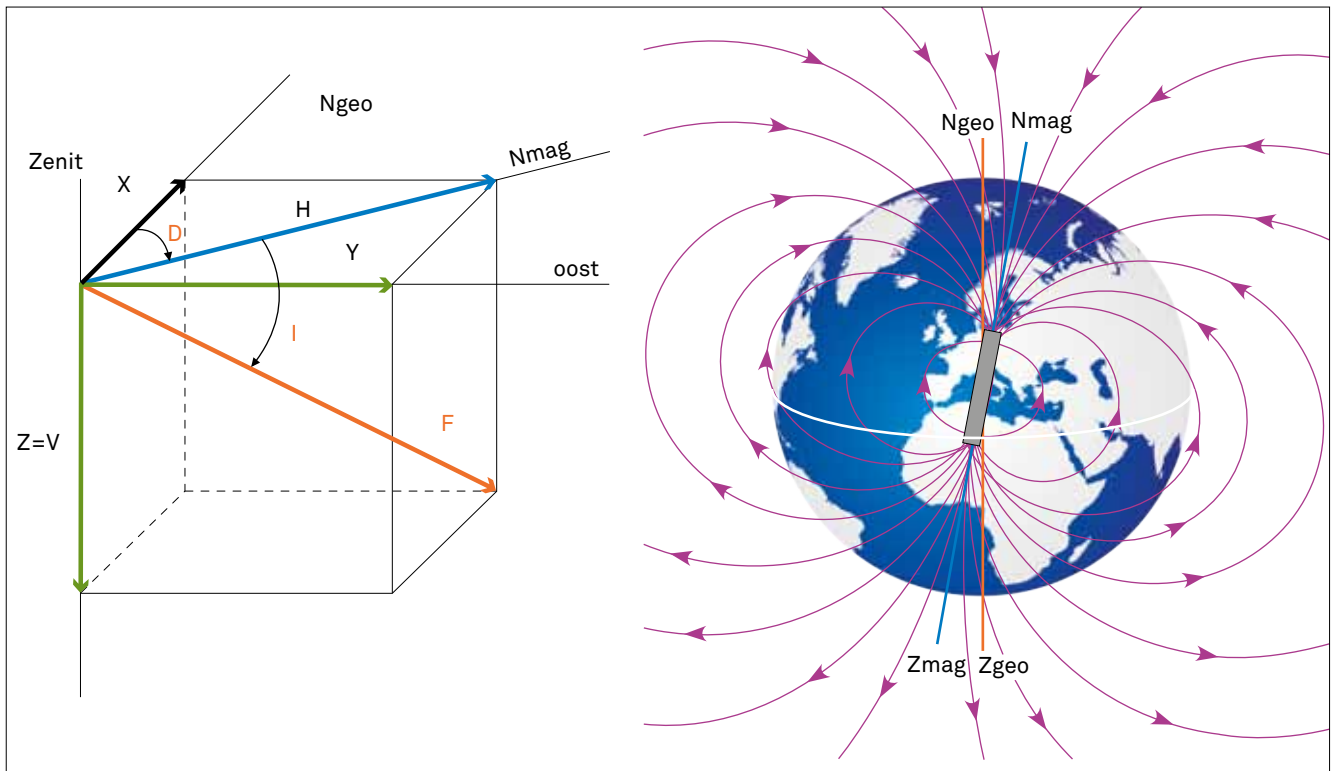
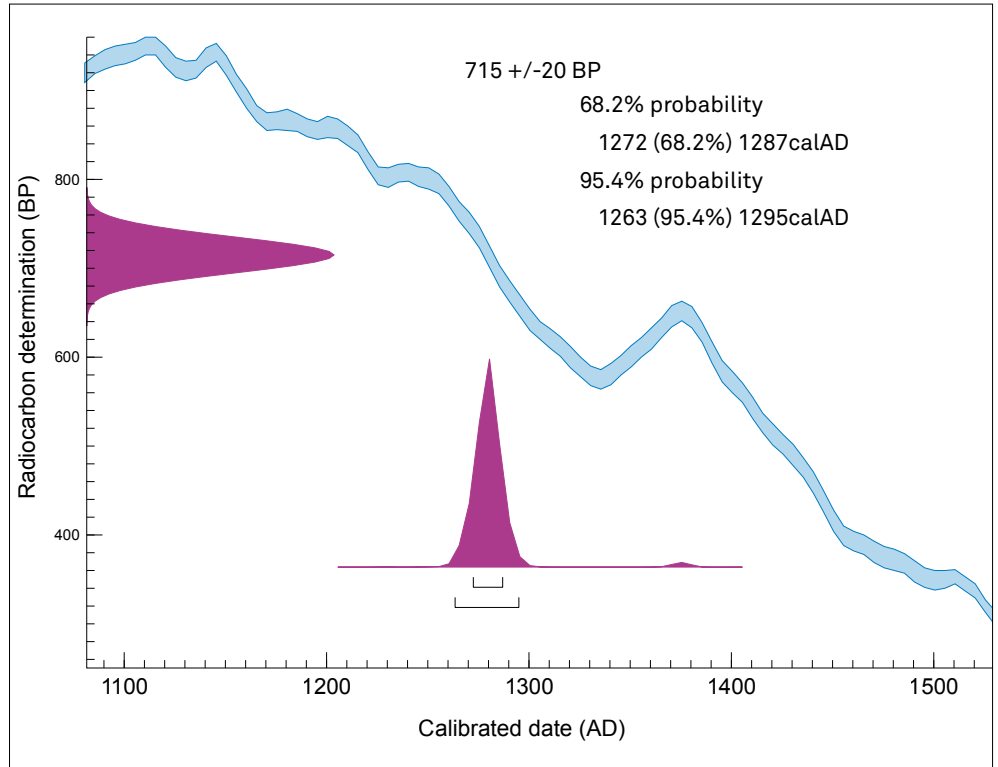


FIG. 23A-B Definitie van de elementen van het geomagnetische veld (D = declinatie, I = inclinatie, F = totaal veld, H = horizontale component, Z = verticale component).

Representation of the different elements of the geomagnetic field (D = declination, I = inclination, F = total field, H = horizontal component, Z = vertical component).

De schommelingen in het ΔMV van jaar tot jaar noemt men per definitie de seculaire verandering. Indien deze tijdsgebonden veranderingen bekend zijn, kan men verbrande of gebakken materialen, die niet verplaatst werden na afkoeling, dateren na meting van de remanente magnetisatie. Ferromagnetische mineralen in de klei, meestal ijzeroxides, registreren het ΔMV tijdens de afkoeling na verhitting, onder de vorm van een remanente magnetisatie die men een thermoremanente magnetisatie (TRM) noemt. In homogene, isotrope materialen stemt de richting van de TRM overeen met die van het ΔMV en is de remanentie-intensiteit evenredig met de intensiteit van het ΔMV .

Aardewerk geproduceerd in een oven, maar verplaatst na het bakken, kan men dus gebruiken om de intensiteit maar niet om de richting van het ΔMV te bepalen. De inclinatie kan men echter wel terugvinden indien de stand van het aardewerk in de oven tijdens het bakken bekend is⁷⁵. Dit is het geval voor bakstenen, tegels en aardewerk die verticaal of horizontaal gebakken werden. Indien we aannemen dat bakstenen met de zijkant (met de strek horizontaal), rechtstaand (met de kop horizontaal) of vlak (met de boven- of onderzijde horizontaal) op de vloer van de oven werden gestapeld (fig. 2.4a-b), dan is het mogelijk om de inclinatie van het ΔMV te bepalen, aannemend dat de oven-

vloer horizontaal was⁷⁶. Inderdaad, gedurende de laatste 2000 jaar veranderde de inclinatie in het interval van $+50^\circ$ tot $+75^\circ$ in West-Europa⁷⁷. Indien de hogervermelde hypothese geldt, moet de inclinatie overeenstemmen met een van de hoeken tussen de gemeten remanente magnetisatie en de drie loodrechte zijvlakken van de bakstenen. Hoeken niet begrepen in het interval $+50$ tot $+75^\circ$ kan men buiten beschouwing laten. In het gunstige geval vindt men de inclinatie, en informeert de TRM-vector ons over de stapelwijze van de bakstenen (plat, rechtstaand of op de zijkant) tijdens het bakken.

Deze hypothese werd getoetst voor bakstenen uit de muren van het middenschip van de Sint-Andreas- en Sint-Gislenuskerk. Aan de hand van een archeomagnetische analyse werd nagegaan of die tot een datering van het bakproces kon leiden. Bovendien hoopte men door deze analyse meer informatie te verkrijgen over de stapeling van de bakstenen tijdens het bakproces. Tot nu toe zijn in Vlaanderen dateringen aan de hand van archeomagnetische analyse enkel toegepast op niet verplaatste (bouw) ceramiek⁷⁸. Het onderzoek in Belsele is de eerste poging om een archeomagnetische datering op baksteen uit te voeren in bouwkundig erfgoed in Vlaanderen, en dus buiten de originele oven waarin ze gebakken werden.

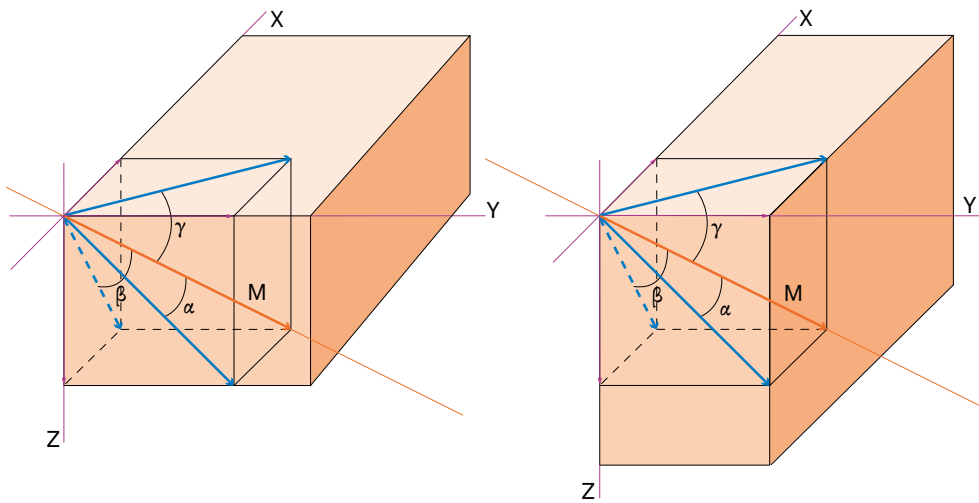


FIG. 2.4A-B Definitie van de hoeken α , β en γ tussen de magnetisatievector M en drie loodrechte vlakken van de bakstenen. Stalen voor archeomagnetische analyse van losse bakstenen werden geboord volgens de Z -as, loodrecht op de bovenzijde van de baksteen (fig. 2.4a). De strek stemt hierbij overeen met het XZ -vlak en de kop met het YZ -vlak. Stalen voor archeomagnetische analyse van bakstenen in het metselwerk van de muur werden geboord loodrecht op de strek van de baksteen (fig. 2.4b). In dit geval is de Z -as loodrecht op de strek maar de definitie van de hoeken α , β en γ blijft onveranderd.

Definition of the angles α , β and γ between the magnetization vector M and three perpendicular sides of the bricks. Samples for archaeomagnetic analysis of loose bricks were drilled following the Z -axis, perpendicular to the upper side of the brick (fig. 2.4a). The XZ -plane then defines the stretcher and the YZ -plane the header of the brick. Samples for archaeomagnetic analysis of bricks in the masonry of the wall were drilled perpendicular to the stretcher of the bricks (fig. 2.4b). In this case the Z -axis is perpendicular to the stretcher but the definition of the angles α , β and γ remains unchanged.

⁷⁵ Thellier 1936; Goulpeau 1984; Langouet et al. 1986; Lanos 1987; Hus et al. 2003.

⁷⁶ Lanos 1994.

⁷⁷ Batt 1997; Gallet et al. 2002.

⁷⁸ Hus et al. 2003.

3.4.2 Methode

Uit de noordmuur van het middenschip werden met een draagbaar boortoestel cilindervormige stalen (2,5 cm diameter) geboord, loodrecht op de strek van de bakstenen. Een eerste groep stalen werd genomen uit drie bakstenen (stalen E04 t.e.m. E06), een tweede groep uit twee bakstenen (stalen E07 t.e.m. E08) en een derde groep uit zeven bakstenen (E09 t.e.m. E15). Tien losse stukken baksteen werden eveneens verzameld aan de voet van de muur en op de gewelven. Deze losse bakstenen hebben hetzelfde formaat als de bakstenen in het metselwerk en behoren zonder twijfel tot dezelfde context. De fragmenten werden genummerd E01, E02, E03, E16, E17 tot en met E22. Uit deze stukken werden in het laboratorium boorkernen loodrecht op het grootste vlak van de bakstenen geboord. Deze boorkernen werden gebruikt als referentie.

De natuurlijke remanente magnetisatie van de stalen werd gemeten in een triaxiale cryogene 2G-magnetometer. Dit toestel meet de totale magnetische fluxverandering die optreedt wanneer men het gemagnetiseerde staal in drie loodrechte supergeleidende spoelen brengt. Op deze wijze worden de drie magnetisatiecomponenten volgens drie loodrechte richtingen X, Y en Z verkregen, waarbij Z (steeds evenwijdig met de boorrichting) in het geval van de losse bakstenen loodrecht is op het grootste vlak (fig. 2.4a), en in het geval van de bakstenen in de muur loodrecht op de strek (fig. 2.4b).

Vooraleer men de remanente magnetisatie van bakstenen kan gebruiken om de inclinatie van het AMV te bepalen, moet men de oorspronkelijke TRM isoleren en ongewenste remanente magnetisatiecomponenten, die na het bakproces opgetreden zijn, verwijderen. Inderdaad, de remanente magnetisatie van een gebakken materiaal is meestal een magnetisatie bestaande uit verschillende componenten waarbij spontaan een mogelijk belangrijke viskeuze remanente magnetisatie (VRM) optreedt. Deze VRM is het gevolg van een thermische activering van magnetische momenten (*spins*) in het veld waarin de bakstenen verblijven, zelfs bij normale temperatuur.

De verschillende magnetisatiecomponenten kunnen worden onderscheiden door stapsgewijze demagnetisatie van de TRM in toenemende wisselmagneetvelden of door verhitting gevolgd door een afkoeling in een nulveld. Verschillende stalen werden stapsgewijs gedemagnetiseerd in wisselmagneetvelden met stappen van 5 milliTesla (mT) tot 50 mT en vervolgens met stappen van 10 mT tot 100 mT (fig. 2.5a). Dit gebeurde in een 2G-demagnetisatietoestel, in lijn geplaatst met de 2G-magnetometer. Voor elke demagnetisatiestap wordt een gedeelte van de remanente magnetisatie over willekeurige richtingen verspreid. Wanneer het staal slechts één enkele remanente magnetisatiecomponent bevat, zal de magnetisatie-intensiteit afnemen zonder dat de magnetisatie-richting verandert. De demagnetisatiecurven in figuur 25 stellen de verhouding voor van de overblijvende remanente magnetisatie na elke demagnetisatiestap tot de natuurlijke remanente magnetisatie (NRM) of magnetisatie 'in situ'. De curven zijn convex in zwakke wisselvelden en wijzen op een hoge stabiliteit, typisch voor een TRM. Een maat voor de stabiliteit is de *median destructive field* (MDF), of het wisselveld nodig om de oorspronkelijke remanentie tot de helft terug te brengen. De waarde van de MDF

verandert sterk van staal tot staal, maar overschrijdt 20 mT in alle stalen. In het staal 22.01 is de overblijvende remanentie, na toepassing van een wisselmagneetveld van 100 mT, zelfs 80% en de MDF waarde dus groter dan 100 mT. De geringe toename in zwakke magneetvelden in sommige stalen duidt op de aanwezigheid van een VRM. Dit komt beter tot uiting wanneer men het uiteinde van de magnetisatievector loodrecht projecteert op twee loodrechte vlakken (fig. 2.5b). Wanneer een staal slechts één enkele magnetisatiecomponent bevat, zullen de projectiepunten vallen op een rechte lijn die door de oorsprong gaat. Wanneer het staal daarentegen verschillende componenten bevat, met verschillende richtingen en stabiliteit, zal de grafiek meestal verschillende lineaire segmenten vertonen waarbij de meest stabiele door de oorsprong gaat. Uit de demagnetisatietesten blijkt dat de stalen naast een zwakke VRM één enkele stabiele magnetisatiecomponent bezitten. Deze magnetisatie noemen we de karakteristieke remanente magnetisatie (ChRM). De andere stalen werden behandeld in wisselvelden van 15, 20, en 25 mT om de ChRM te isoleren. Ook werden enkele thermische demagnetisaties uitgevoerd door verhitting van de stalen in lucht, met stappen van 45° C vanaf 150° C tot en met 615° C in een niet-magnetische oven, en af te koelen in een nulveld (fig. 2.6). Mineralogische veranderingen die mogelijk optreden tijdens het verhitten werden gecontroleerd door na afkoeling telkens de totale magnetische susceptibiliteit in een zwak veld te meten. De totale veranderingen van de magnetische susceptibiliteit na verhitting bij de maximale temperatuur van 615° C zijn kleiner dan 20%, wat wijst op slechts gematigde chemische veranderingen tijdens de behandeling.

3.4.3 Berekening van de inclinatie

Tabel 4 toont de resultaten van de remanentiemetingen. Indien we aannemen dat de bakstenen horizontaal of verticaal waren gestapeld tijdens het bakken, dan moet de geomagnetische inclinatie overeenstemmen met een van de hoeken a, b of g tussen de remanentievector en drie loodrechte zijvlakken van de bakstenen, waarbij het noordzoekende uiteinde naar beneden wijst (fig. 2.4). We noemen a, b en g de hoeken tussen de magnetisatievector en respectievelijk het YZ-, XZ- en XY-vlak. Voor de stalen genomen in de bakstenen muur stemt het XY-vlak overeen met de strek van de bakstenen, voor de losse stukken met de bovenzijde.

Uit curven die de seculaire verandering van I voor West-Europa voorstellen, weten we dat de hoek die we zoeken begrepen moet zijn tussen +50° en +75° (fig. 2.7). Bij alle geanalyseerde stalen van de bakstenen muur is dit het geval voor de hoek g, en voor de losse stukken geldt dit voor de hoek a of b (tabel 4, getallen in blauw). Dit impliceert dat alle bakstenen tijdens hun productie op hun strek in de oven gestapeld waren. Uit tabel 4 volgt dat, niettegenstaande het beperkte aantal onderzochte bakstenen (22 in totaal), de spreiding van de individuele inclinaties relatief klein is en de gemiddelde inclinaties van de stalen genomen in de muur en in de losse stukken minder dan 1° verschillen.

Wanneer de gegevens uitsluitend inclinaties zijn en de declinaties niet bekend zijn, is het moeilijk om zonder systematische fout (*unbiased*) een gemiddelde inclinatie te schatten. Simpelweg het rekenkundig gemiddelde berekenen, dat hier 63,7° bedraagt, is echter een (*biased*) schatting met systematische fout⁷⁹.

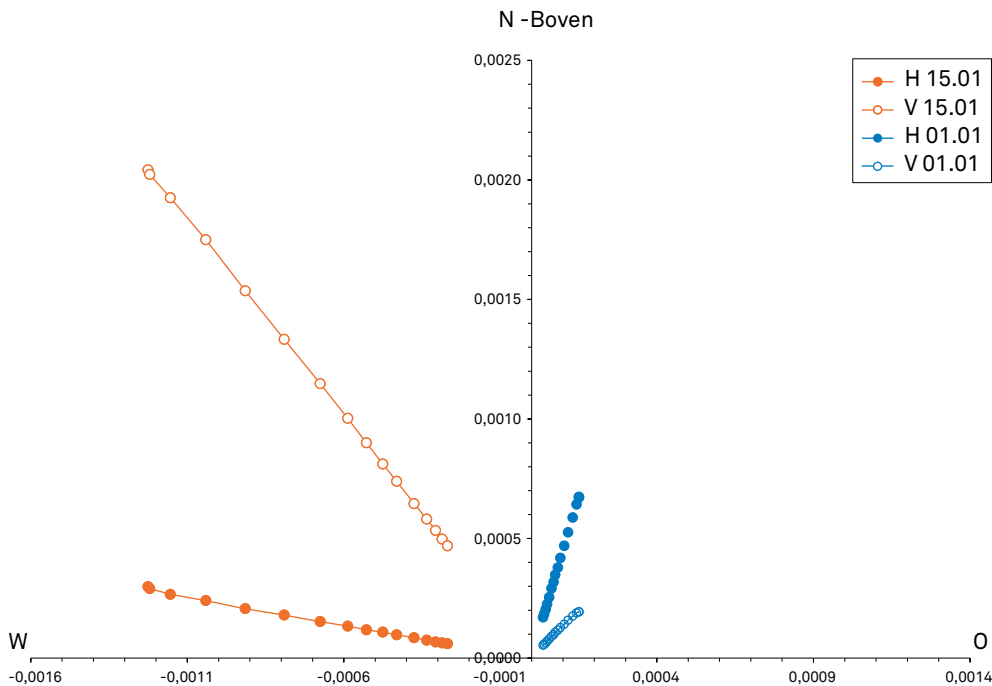
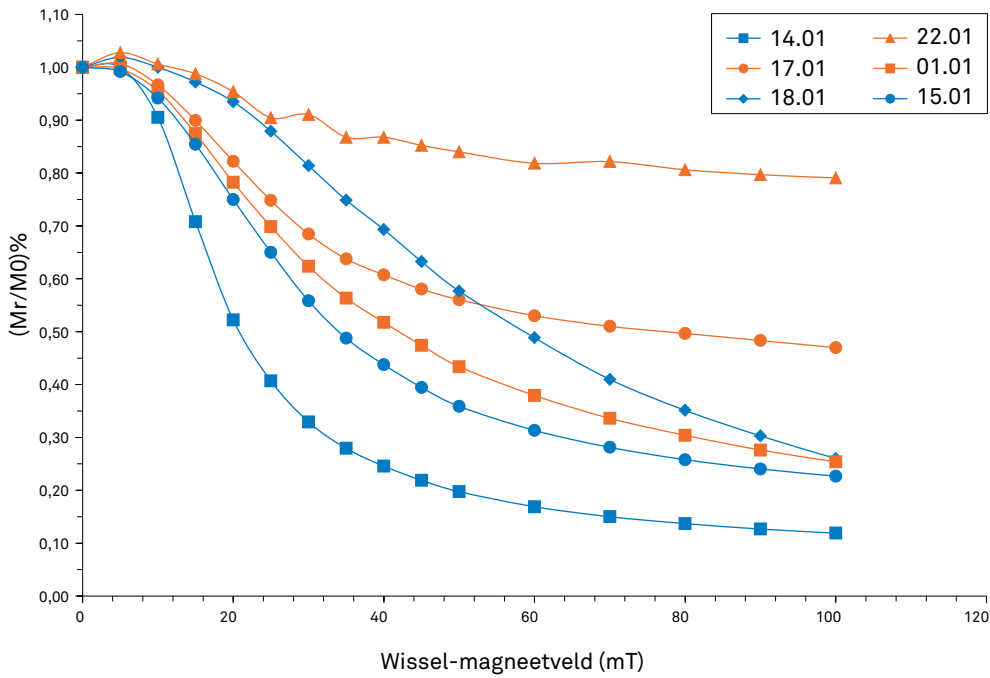
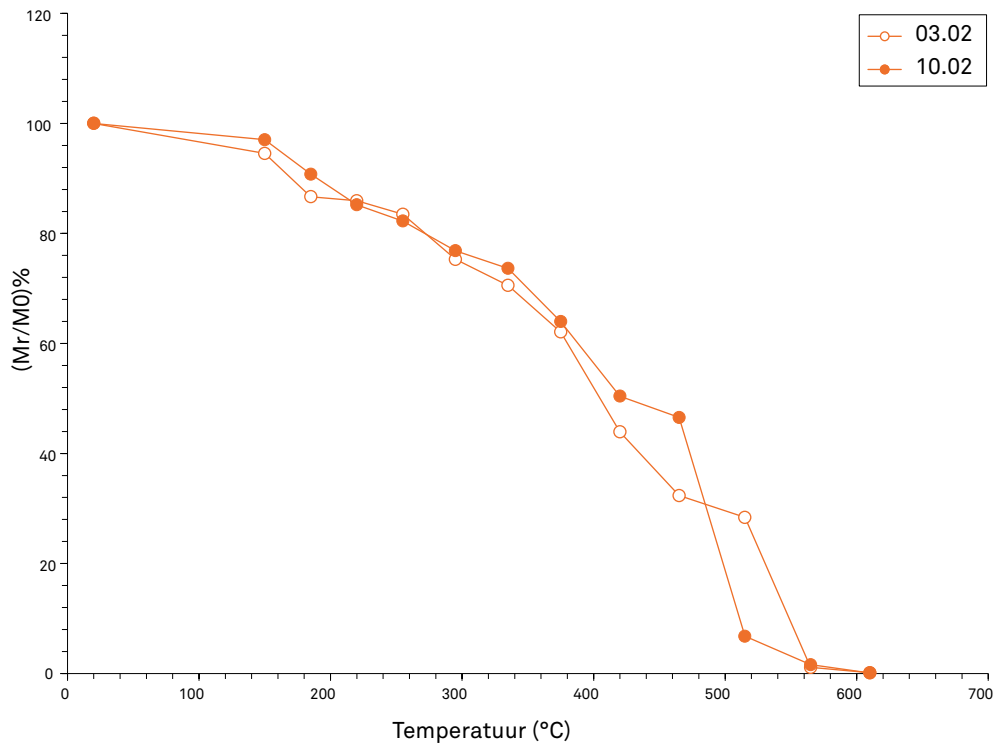


FIG. 25A-B Wisselveldendemagnetisatie van zes baksteenstalen. Grafiek a stelt de verhouding voor van de overblijvende tot de oorspronkelijke remanente magnetisatie in functie van de amplitude van het wisselmagneetveld voor elke demagnetisatiestap. Grafiek b toont de orthogonale projectie van de remanente magnetisatie tijdens de wisselveldendemagnetisatie. De volle cirkels stellen de projectie van het eindpunt van de magnetisatievector voor op het horizontaal vlak en de open cirkels op een verticaal vlak dat de O-W-richting bevat, en dit voor elke demagnetisatiestap.

Alternating field demagnetization of six brick samples. Graph a represents the ratio of the residual to the original remanent magnetization as a function of the amplitude of the alternating magnetic field for each demagnetization step. Graph b shows an orthogonal projection of the remanent magnetization during alternating field demagnetization. Full circles represent the projection of the end point of the magnetization vector on the horizontal plane; open circles represent the projection of the end point of the magnetization vector on a vertical plane containing the E-W direction, and such for each demagnetization step.

FIG. 26 Thermische demagnetisatie. De grafieken stellen de verhouding van de overblijvende tot de oorspronkelijke remanente magnetisatie voor in functie van de temperatuur voor elke demagnetisatiestap. *Thermal demagnetization. The graphics represent the ratio of the residual to the original remanent magnetization as a function of the temperature for each demagnetization step.*



Onlangs ontwikkelden Arason & Levi een robuuste methode om de meest aannemelijke schatting (*maximum likelihood estimate*) van de gemiddelde inclinatie en juistheidsfactor te bepalen⁸⁰. Toepassing van deze methode levert $64,1^\circ$ op voor de gemiddelde inclinatie I_m met een betrouwbaarheidsfactor $a_{95} = 2,4^\circ$ (tabel 5). De parameter a_{95} stelt de halve openingshoek voor van de kegel omheen de gemiddelde richting, waarin de ware richting zich met 95% kans bevindt. Uit tabel 5 blijkt bovendien dat de gemiddelde inclinatie van de stalen afkomstig van boringen in de muur (10 in totaal) en in de verzamelde stukken bakstenen (12 in totaal) minder dan 1° verschilt en dat de mediaanwaarden dezelfde zijn.

3.4.4 Archeomagnetische datering

Voor de archeomagnetische datering doen we een beroep op het standaarddiagram van de seculaire verandering van de inclinatie $I(t)$, opgesteld voor Frankrijk en gereduceerd tot één enkele centrale plaats (Parijs)⁸¹. Dit diagram werd verkregen door meting van onafhankelijk gedateerde verbrande structuren en materialen⁸². Deze keuze is verantwoord omdat onze bemonsteringsplaats voldoende dicht bij Parijs gelegen is, zodat we mogen aannemen dat de seculaire verandering van het veld op beide plaatsen bijna identiek is⁸³. Alvorens onze resultaten te confronteren met de referentiecurve werd de gevonden gemiddelde waarde I_m voor de bakstenen uit Belsele herleid tot Parijs. Op basis van het Internationaal Geomagnetisch Referentieveld (IGRF) bedraagt het huidige verschil in inclinatie tussen beide plaatsen $1,9^\circ$. De overeenstemmende inclinatie zonder systematische fout (*unbiased*) in Parijs wordt voor de onderzochte bakste-

nen $62,2^\circ$. De vraag is nu wat het tijdstip is waarop deze inclinatie werd geregistreerd in Parijs. Waarschijnlijkheidsdichtheden voor mogelijke ouderdommen werden uiteindelijk verkregen op basis van deze inclinatie na toepassing van het algoritme van Lanos en de software Rendate⁸⁴. De meest waarschijnlijke (95%) ouderdom is begrepen in het interval 991-1185 A.D. of in het interval 1460-1547 A.D. Door recurrentie van de inclinatie, dit wil zeggen dat eenzelfde inclinatie op meerdere tijdstippen kan terugkomen, werden twee waarschijnlijke oplossingen gevonden: 1066 (-75, +119) A.D. en 1504 (-44, +43) A.D. (fig. 27). Aangezien de bemonsterde bakstenen ongetwijfeld middeleeuwse productie zijn en geen hergebruikte Romeinse bouwceramiek, kan de archeomagnetische datering in de Romeinse tijd (eind 1ste tot 5de eeuw, zie fig. 27) worden uitgesloten.

3.4.5 Discussie

De nauwkeurigheid van een archeomagnetische datering op basis van de inclinatie alleen is afhankelijk van verscheidene factoren, in de eerste plaats van de kwaliteit van de veldregistrering en meetgegevens, de nauwkeurigheid van de referentiecurve en de horizontaliteit van de ovenvloer van de oven waarin de bakstenen werden geproduceerd.

Volgende factoren moeten in acht genomen worden:

- Meetfouten inherent aan de gebruikte toestellen.
- Oriëntatiefouten (tijdens de staalname, niet-verticale stapeling van de bakstenen in de oven, hellende ovenvloer).
- Niet-parallellisme van de TRM en de fossiele veldrichting (anisotropie, magnetische interactie, magnetische refractie)⁸⁵.

80 Arason & Levi 2010.

81 Gallet *et al.* 2002.

82 Thellier 1981; Bucur 1994; Gallet *et al.* 2002.

83 Noël & Batt 1997.

84 Lanos 2001; Lanos 2004; Lanos *et al.* 2005.

85 Hus & Geeraerts 2005.

- De nauwkeurigheid van de referentiecurve, die vooral wordt bepaald door de nauwkeurigheid van de gebruikte chronologieën waarmee ze wordt opgesteld.
- Niet-geldigheid van veronderstellingen gemaakt tijdens de reductie van de gegevens naar de referentieplaats (niet-di-

poolcomponent, ruimtelijke veranderingen van de seculaire verandering, niet-centrisch veld) en dus de afstand tussen de site en de referentieplaats.

- De snelheid van de inclinatieverandering van het AMV in het verleden.

TABEL 4

Resultaten van de remanentiemetingen met de absolute waarden van de hoeken a , b en g tussen de stabiele remanentievectoren en drie loodrechte zijvlakken van de bakstenen. De hoeken overeenstemmend met de inclinatie zijn in het blauw.

Results of the remanence measurements with the absolute values of the angles a , b and g between the stable remanence vector and three perpendicular sides of the bricks. Angles corresponding to the inclination are in blue.

Staal	Specimen	M = muur L = los	γ (°)	β (°)	α (°)
E01	So1	L	16,30	11,99	69,56
	So2	L	15,80	9,52	71,42
E02	So1	L	17,80	12,56	67,97
E03	So1	L	22,10	18,57	60,47
	So2	L	24,00	14,77	61,32
E04	So1	M	67,00	11,71	19,50
E05	So1	M	64,60	10,01	23,09
E06	So1	M	64,50	18,01	17,43
E07	So1	M	59,10	7,64	29,74
E08	So1	M	57,00	2,50	32,88
	So2	M	59,20	5,71	30,15
E09	So1	M	67,00	10,15	20,41
	So2	M	66,10	23,77	2,39
E10	So1	M	63,70	15,79	20,46
	So2	M	58,40	24,88	18,20
E11	So1	M	64,20	25,77	1,22
E12	So1	M	59,80	26,42	13,57
	So2	M	57,10	32,22	5,95
E13	So1	M	66,50	5,77	22,70
E14	So1	M	71,20	18,16	4,69
E15	So1	M	58,60	30,52	6,68
E16	So1	L	16,20	15,25	67,45
	So2	L	17,20	9,83	70,03
E17	So1	L	26,70	17,09	57,53
	So2	L	26,00	18,88	56,99
E18	So1	L	21,30	12,56	64,95
	So2	L	20,70	12,05	65,76
E19	So1	L	14,30	23,79	61,77
	So2	L	11,40	25,06	62,13
E20	So1	L	14,50	23,48	61,93
	So2	L	14,20	19,85	65,24
E21	So1	L	12,10	16,03	69,72
	So2	L	14,80	14,59	68,98
E22	So1	L	13,80	55,81	30,59
	So2	L	14,40	56,84	29,16

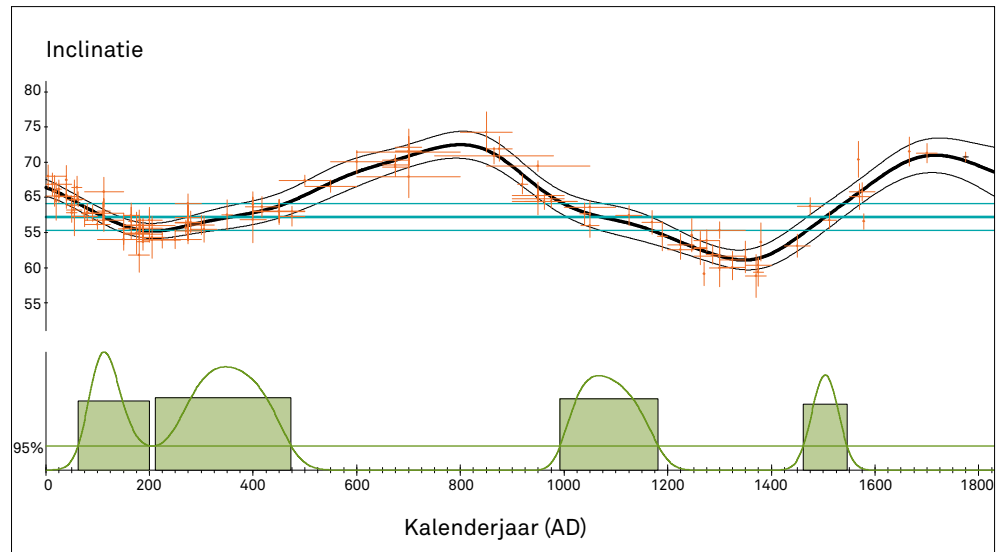


FIG. 27 Archeomagnetische datering, d.m.v. de referentiecure $I(t)$ voor Frankrijk en de software Rendate (Gallet *et al.* 2002; Lanos 2004). De dikke zwarte curve stelt de verandering van I voor te Parijs en de dunne zwarte curven de fouten. De dikke blauwe horizontale lijn stemt overeen met de berekende gemiddelde waarde I_m voor de bakstenen herleid tot Parijs met de foutenmarge (95%). Het diagram onderaan toont de waarschijnlijkheidsdichtheid van alle mogelijke tijdstippen van productie van de bemonsterde bakstenen.

*Archaeomagnetic dating by use of the reference curve $I(t)$ for France and Rendate software (Gallet *et al.* 2002; Lanos 2004). The thick black curve represents the change of I in Paris whereas thin black curves represent the margins of error. The thick blue horizontal line corresponds to the calculated mean value I_m for bricks reduced to Paris with a 95% margin of error. The diagram below shows the probability density for all possible time intervals for the production of the sampled bricks.*

TABEL 5

gemiddelde inclinatie (biased en unbiased) voor stalen genomen in de muur en stalen genomen uit losse bakstenen (s.d. = standaardafwijking, a_{95} = betrouwbaarheidsfactor met een waarschijnlijkheid van 95%).

Mean inclination (biased and unbiased) of samples taken in the wall and of samples taken out of loose bricks (s.d. = standard deviation, a_{95} = reliability factor with 95% likelihood).

	N	I_m	s.d.	mediaan	a_{95}
biased					
muur	12	63,3	4,2	64,35	
losse stukken	10	64,2	5	64,35	
totaal	22	63,7	4,5	64,35	
unbiased					
muur	12	63,6			3,1
losse stukken	10	64,6			4,1
totaal	22	64,1			2,4

De TRM-intensiteit van de bakstenen is begrepen tussen $9,7 \times 10^{-3}$ en $1,8 \times 10^{-4}$ Am²/Kg en de stabiliteitstesten tonen aan dat de stalen naast een geringe vRM, die kan geëlimineerd worden in zwakke wisselmagneetvelden of bij geringe temperaturen, slechts één enkele stabiele remanentiecomponent bevatten. De meetfouten (1) zijn daarom verwaarloosbaar. Het verschil tussen de gemiddelde inclinatie van de *in situ* geboorde kernen 64,2

(± 5) met een draagbaar boortoestel en van de boorkernen genomen in de losse stukken 63,3 (± 4) met een vaststaande boor in het laboratorium, verschilt minder dan 1°. De mediaanwaarden zijn identiek, wat erop wijst dat de oriënteringsfouten (2) gering zijn en vooral bepaald werden door de ruwheid van het oppervlak van de bakstenen en afwijkingen van een perfect parallellepipedum. De anisotropie (3) van de TRM werd niet bepaald, maar AMS-metingen wijzen op een maximale anisotropie van 10% voor de geïnduceerde magnetisatie.

De archeomagnetische datering levert twee tijdsintervallen op waarin het ware tijdstip van de productie van de bakstenen valt, op voorwaarde dat de ovensvloer horizontaal was. De mogelijk juiste oplossing(en) moet(en) getoetst worden aan andere dateringsmethodes. Aangezien de bakstenen geen hergebruikte Romeinse bakstenen zijn, kan de archeomagnetische datering in de 1ste tot 5de eeuw, zoals te zien is in figuur 27, alvast worden verworpen.

3.4.6 Besluit

Het archeomagnetisch onderzoek toonde aan dat de bakstenen slechts één enkele stabiele, tijdens het bakproces verkregen TRM bevatten. Analyse van de hoeken tussen de TRM-vector en drie loodrechte zijvlakken van de bakstenen toont aan dat de bakstenen tijdens het bakken gestapeld werden met de strek evenwijdig met de ovensvloer. Vergelijking van de gemiddelde inclinatie met het standaarddiagram dat de seculaire verandering van de inclinatie in Parijs voorstelt voor de laatste 2000 jaren, leverde twee

plausibele tijdsintervallen voor het tijdstip van het bakproces op: 991-1185 of 1460-1547. De meest waarschijnlijke gevonden ouderdommen zijn alleen aannemelijk indien de bakstenen verticaal werden gestapeld in de oven en de ovenvloer horizontaal was. Na vergelijking van de resultaten van de archeomagnetische datering met die van het radiokoolstofonderzoek op de mortel (1263-1295) en de dendrochronologische datering van de dakkap (1266-1271), blijkt echter dat ze niet in overeenstemming zijn.

3.5 Datering van baksteen en mortel met optisch gestimuleerde luminescentie (OSL)

3.5.1 Inleiding

Bouwmaterialen gemaakt uit gebrande klei, kortweg bouwceramiek, kunnen worden gedateerd op basis van hun luminescentie-eigenschappen. Deze techniek werd al geregeld toegepast op bouwceramiek verwerkt in historische gebouwen, bijvoorbeeld in Jutland⁸⁶, Engeland⁸⁷, Frankrijk⁸⁸, Oezbekistan⁸⁹ en Japan⁹⁰. In het geval van bouwceramiek is de gedateerde gebeurtenis de laatste verhitting (minstens tot 300° C). Dat is doorgaans het bakken van bouwceramiek, maar het kan ook gaan om een nieuwe verhitting tijdens een brand. Er kan worden aangenomen dat voor baksteen, doelbewust vervaardigd voor de constructie van een gebouw, de tijd tussen productie en verwerking in het gebouw relatief kort is. Hergebruik van Romeinse bouwceramiek in vroegmiddeleeuwse gebouwen komt echter vaak voor, terwijl bijvoorbeeld in Engeland recyclage van baksteen in laatmiddeleeuwse gebouwen werd vastgesteld⁹¹. De problematiek van hergebruik en recyclage van baksteen was ook de aanleiding tot een onderzoek naar de toepassing van luminescentie voor de datering van (kalk)mortel in metselwerk waarin bouwceramiek is verwerkt. Deze toepassing van luminescentie werd eerder al mogelijk geacht voor de datering van niet-hydraulische mortel in natuurstenenmetselwerk⁹². In wat volgt worden bouwmaterialen uit de kerk van Belsele onderzocht op hun geschiktheid voor luminescentiedatering, in het bijzonder meettechnieken gebaseerd op optisch gestimuleerde luminescentie (*optically stimulated luminescence*, OSL). De eerste resultaten verkregen uit de tests op zowel baksteen als mortel uit de parochiekerk van Belsele worden behandeld en voorzien van een beknopt overzicht van de basisprincipes van de methode⁹³.

3.5.2 Basisprincipes en methodologie

Luminescentiedatering is een dateringsmethode gebaseerd op de eigenschap van luminescente kristallen om, na zekere tijd te zijn blootgesteld aan ioniserende straling, op te lichten door stimulering met hitte (thermoluminescentie, TL) of licht (optisch gestimuleerde luminescentie, OSL)⁹⁴. De intensiteit van het uitgestraalde licht is hierbij evenredig met de hoeveelheid ioniserende straling die de kristallen doorheen de tijd hebben ontvangen. De oplichting van luminescente kristallen wijst op de vrijgave van een elektrische lading die in de kristalstructuur werd opgeslagen ten gevolge van in de omgeving natuurlijk aan-

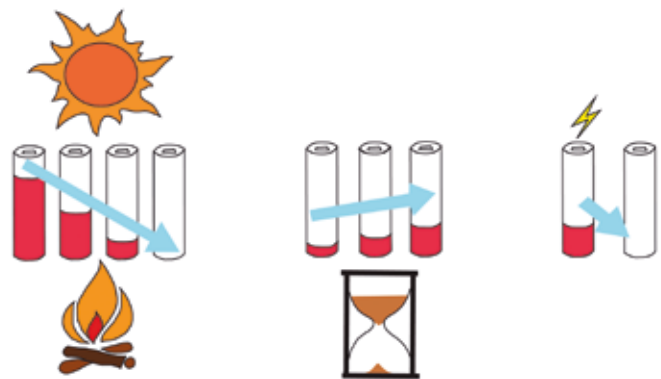


FIG. 28 De kristallen in het te dateren materiaal kunnen vergeleken worden met oplaadbare batterijen. In een eerste fase worden bij blootstelling aan zonlicht of hitte de 'batterijen' (kristallen) ontladen; daarna, onder invloed van in de omgeving aanwezige ioniserende straling wordt een elektrische lading opgebouwd in de kristallen; uiteindelijk wordt in het labo deze lading aan de kristallen onttrokken door stimulatie (naar Duller 2008).

The crystals within the material to be dated can be compared to (dis)charging batteries: first, the heat or light exposure resets the material which causes the discharging of the batteries; then, with the effects of the surrounding radioactivity lead to the continuous build-up of stored charge; finally, in the laboratory, when applying stimulation to crystals extracted from the sample, the stored charge is released (after Duller 2008).

wezige ioniserende straling. Kristallijne materialen zoals kwarts, een typisch ingrediënt in de samenstelling van (bouw)ceramiek, ontvangen een natuurlijke hoeveelheid ioniserende straling door α - en β -partikels en door γ -stralen. Deze straling wordt behalve door kosmische straling ook met lage maar vaste snelheid uitgezonden door radionucliden, dit zijn elementen met een onstabiele atoomkern, die van nature aanwezig zijn in diverse materialen (de radioactieve isotopen van uranium, thorium en potasium zijn aanwezig in rotsen, kleien, bodems en sedimenten). De concentratie van radionucliden in zowel het te dateren stuk bouwceramiek als in het omringende materiaal, bepaalt de snelheid waarmee ioniserende straling door de kristallen werd opgenomen – dit is de 'stralingsintensiteit'. De hoeveelheid licht die wordt afgegeven door kristallen uit een stuk baksteen of mortel houdt verband met de steeds grotere hoeveelheid straling waaraan ze werden blootgesteld, dit is de 'paleodosis'. Aangezien de stralingsintensiteit doorgaans constant is, komt de paleodosis overeen met de stralingsintensiteit vermenigvuldigd met de duur van de blootstelling aan straling na het bakken van de baksteen of na blootstelling aan daglicht tijdens het aanmaken van mortel, i.e. het tijdstip dat we willen dateren. Tijdens het bakken of de blootstelling aan daglicht wordt de interne (luminescentie-)klok van een stuk baksteen of mortel weer op nul gezet en start de accumulatie van elektrische lading opnieuw (fig. 28).

⁸⁶ Abrahamsen *et al.* 1997.

⁸⁷ Bailiff & Holland 2000; Bailiff *et al.* 2010.

⁸⁸ Blain 2011; Bouvier *et al.* 2012.

⁸⁹ Vieilleigne *et al.* 2006; Vieilleigne *et al.*

2007.

⁹⁰ Leung *et al.* 2005.

⁹¹ Bailiff *et al.* 2010.

⁹² Goedicke 2003; Goedicke 2011; Gueli *et al.*

2010.

⁹³ Een gedetailleerde toelichting van OSL als

dateringstechniek is te vinden in Aitken 1985; Duller 2008; Bailiff *et al.* 2010; Blain 2011.

⁹⁴ Aitken 1985.

Als we aannemen dat de interne klok inderdaad op nul werd gebracht, dan is de vergelijking van de luminescentiedatering als volgt:

$$\text{Luminescentieleeftijd (jaren)} = \frac{\text{Paleodosis (mGy)}}{\text{Jaarlijkse stralingsdosis (mGy/year)}}$$

De onzekerheid van een luminescentiedatering bedraagt ± 5 tot $\pm 10\%$ van de leeftijd.

Dankzij de aanwezigheid van kwartskorrels afkomstig uit kalksteen of zandige aggregaten kan ook mortel worden gedateerd met de luminescentiemethode (fig. 15). Indien de korrels tijdens de aanmaak van de mortel gedurende minstens enkele minuten werden blootgesteld aan direct zonlicht, dan werd de interne klok van de korrels allicht op nul gezet. De met luminescentie gedateerde gebeurtenis is dan de laatste blootstelling van de kwartskorrels aan daglicht tijdens het aanmaken van mortel, net voordat die werd gevoegd en het binnenste van de mortelspecie werd afgesloten van het daglicht.

3.5.3 Staalname

Het onderzoek naar de haalbaarheid van luminescentiedatering in Belsele werd uitgevoerd op losse bakstenen en op stukjes mortel die met beitel en hamer uit het voegwerk werden verwijderd. Hierbij was het in de eerste plaats de bedoeling om de geschiktheid van de luminescente mineralen vast te stellen voor datering. In meer gedetailleerd onderzoek worden monsters uit baksteen gelicht met behulp van een met boorvloeistof gekoelde diamantboor en wordt de visuele schade gecorrigeerd door de gaten in de baksteen op te vullen met een volgens het metselwerk bijgekleurde kalkmortel. De keuze van de locaties voor monsternamen gebeurt in functie van een weloverwogen afbakening van de te beantwoorden bouwhistorische vragen (fig. 11-12).

3.5.4 Voorbereiding van de stalen en meetmethode

Na het pletten en zeven van de baksteen- en mortelstalen worden in het labo onder gedempt rood licht kwartskorrels met een diameter van ca. 100 micron geselecteerd. De luminescentiemetingen worden uitgevoerd op meerdere kleine korrels die elk op een schijf in een semi-geautomatiseerde lezer worden aangebracht (Risø National Laboratory, Denemarken). Een optisch gestimuleerde luminescentiemeting (OSL) van de kwartskorrels werd uitgevoerd om de paleodosis van de monsters uit Belsele te bepalen. In het geval van Belsele wordt de totale stralingsintensiteit bepaald door het inschatten van de stralingsbijdrage afkomstig van radioactieve isotopen die aanwezig zijn in de onderzochte stalen. Ook de kwartskorrels zelf werden gescreend op de aanwezigheid van radioactieve isotopen.

3.5.5 Resultaten

Een stuk baksteen uit de noordelijke langsmuur van het middenschip werd geanalyseerd in het Luminescence Laboratory van de Universiteit van Durham (UK). De kwartskorrels uit de baksteen vertoonden een luminescentie waarvan de intensiteit het achtergrondsignaal van de detector niet oversteeg, en daardoor ook te gering was om er de paleodosis uit af te leiden. Een dergelijk zwakke OSL-intensiteit doet zich inderdaad soms voor, voornamelijk wegens de geologische oorsprong van het kwarts. Daarnaast kan niet uitgesloten worden dat ook de atmosferische omstandigheden tijdens het bakken van de klei hierin een rol kunnen spelen. Ook de thermoluminescentie werd bepaald, maar ook die was te zwak. De metingen die in het IRAMAT (Institut de Recherche sur les Archéomatériaux) van de Universiteit van Bordeaux werden uitgevoerd op kwartskorrels uit de mortel lieten net als het baksteenmonster een zwakke luminescentie zien, te zwak om de paleodosis te bepalen. De luminescente eigenschappen van zowel het baksteen- als mortelstaal bleken dus ongeschikt om tot een datering te komen.

3.5.6 Conclusie

Het kwarts uit de baksteen- en mortelstalen uit Belsele bleek niet geschikt voor een luminescentiedatering, wat eerder ongewoon is. Hoewel er geen datering werd verkregen, levert de overeenkomst qua luminescente eigenschappen van de baksteen en de mortel wel nuttige informatie op, namelijk dat in beide gevallen de aggregaten wellicht dezelfde geologische herkomst hebben.

Gezien het alomtegenwoordige gebruik van baksteen in middeleeuwse en latere gebouwen biedt Vlaanderen echter wel nog mogelijkheden voor luminescentiedateringen. Dat blijkt alvast uit verkennend onderzoek van de Universiteit van Durham op bakstenen uit de noordelijke buitenzijbeuk van de Onze-Lieve-Vrouwekerk in Brugge; het kwarts bleek geschikt voor daterend onderzoek en er werd inderdaad een voorlopige datering verkregen. Ook proeven die in het laboratorium van Bordeaux werden gedaan op mortelstalen uit de abdijkerken van Floreffe en Maagdendale in Oudenaarde leverden veelbelovende resultaten op. Het kwarts bleek voldoende 'gereset' (accumulatie van lading (luminescentie) wordt op nul-niveau gebracht) tijdens de aanmaak van de mortel en bezat een geschikte OSL-gevoeligheid⁹⁵.

4 Besluit

Uit de resultaten van de diverse dateringstechnieken die werden toegepast op bouwmaterialen uit de Sint-Andreas- en Sint-Gislenuskerk in Belsele (fig. 29) blijkt dat het dendrochronologisch onderzoek op het bouwhout uit de kap van het schip de meest accurate en precieze datering oplevert voor de bouw van de kerk. Dit is niet verwonderlijk, aangezien via dendrochronologisch onderzoek op historisch bouwhout en ander houten erfgoed de kapdatum van de boom kan bepaald worden tot op het jaar, en in sommige gevallen zelfs tot op het seizoen, een precisie die tot

⁹⁵ *Vers la datation directe du bâti: potentiel et limites de la datation par OSL des mortiers de chaux*, poster voorgesteld S. Blain, P. Urbanova & P. Guibert op *Archeosciences GMPCA*, Caen 22-26 april 2013.

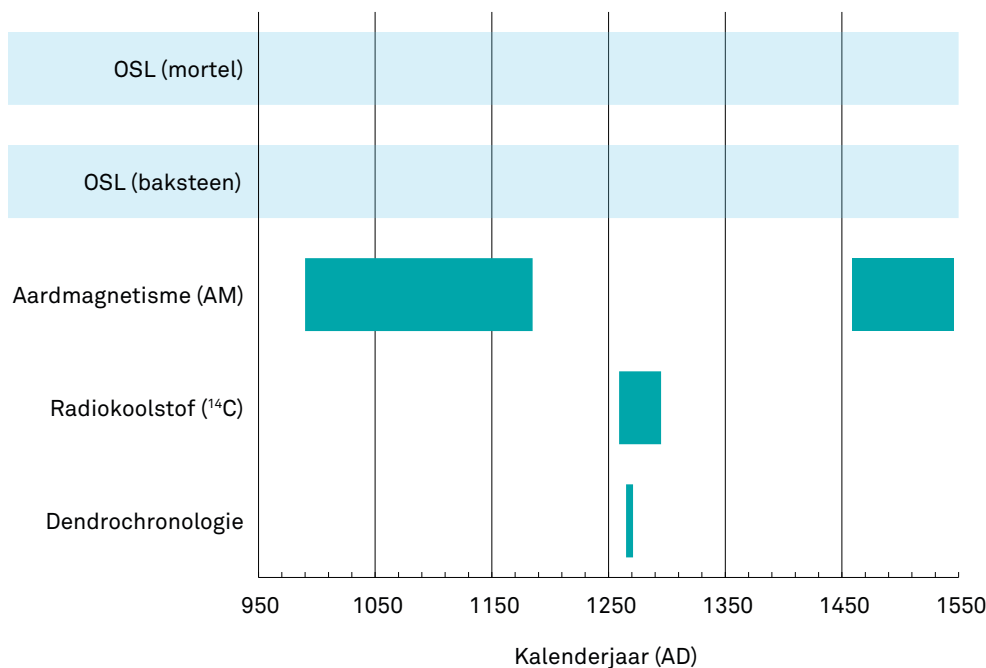


FIG. 29 Overzicht van de dateringsresultaten. De balken geven aan welk tijdsinterval de verschillende dateringstechnieken opleverden. *Overview of the dating results. The bars demarcate the time interval determined by the different dating techniques.*

nu toe niet geëvenaard is door andere natuurwetenschappelijke dateringsmethoden. De gerapporteerde dendrochronologische datering, tussen 1266 en 1271, heeft uiteraard betrekking op de kapdatum van de bomen waaruit het bouwhout werd verkregen, maar de tijd die verstreek tussen het kappen en het bouwen van de kap is meestal minder dan 2 jaar, en vaak gebeurden beide activiteiten zelfs binnen hetzelfde jaar. Het bouwhout uit het koor en de transepten valt echter niet te dateren met dendrochronologie aangezien dit hout gekenmerkt wordt door bredere ringen en er op een dwarse doorsnede te weinig ringen af te lezen zijn. Deze ecologische kenmerken maken dit hout dus ongeschikt om tot een dendrochronologische datering te komen.

De radiokoolstofdatering voor het uitharden van de mortel omvat de dendrochronologische datering met een ruimer interval, namelijk tussen 1263 en 1295. Beide dateringen bevestigen elkaar, zij het dat de radiokoolstofdatering een grotere onzekerheid met zich meedraagt, met in dit geval een dateringsvork van 33 jaar. Ondanks de geslaagde datering in Belsele is radiokoolstofdatering van mortel op basis van atmosferisch CO₂ niet altijd werkbaar. Onderzoek in de Onze-Lieve-Vrouwbasiliek in Tongeren wees op de vertekening van sommige dateringen door carbonaatrijke aggregaten⁹⁶. Met de huidige stand van het onderzoek kan de oorsprong van fossiel carbonaat wel worden aangeduid, maar niet of dat wel of niet tot een plausible datering leidt⁹⁷. Recentelijk werden echter goede resultaten verkregen met een nog experimentele techniek waarin het gebruik van carbonaathoudende aggregaten niet langer een probleem is. De radiokoolstofdatering van de mortel gebeurt hier op kleine kalkklonters (*pure lime lumps*)⁹⁸. Deze techniek werd nog niet toegepast op

bouwkundig erfgoed in Vlaanderen, maar biedt zeker mogelijkheden in de nabije toekomst.

Ondanks het theoretisch kader voor de archeomagnetische datering van bouwceramiek na verplaatsing uit de oven, blijkt deze techniek voor de parochiekerk van Belsele geen goede datering op te leveren, en vallen de voorgestelde tijdsintervallen voor het bakproces buiten de dateringsvork van het dendrochronologisch én radiokoolstofonderzoek. Er is dus duidelijk nog een methodologisch probleem met het dateren van baksteen in gemetseld verband. Aangezien de schommelingen in het aardmagnetisch veld ervoor zorgen dat een bepaalde inclinatie op meerdere tijdstippen kan voorkomen, is het ook nodig om een goede archeologische periodisering te hebben alvorens de voorgestelde dateringsintervallen in aanmerking te nemen. Zo was ook bij de datering van de bakstenen uit Belsele een Romeinse datering mogelijk (fig. 27), maar die werd uiteraard verworpen op basis van bouwhistorische en materiaaltechnische argumenten. Daarentegen kan op basis van dezelfde argumenten geen beslissing genomen worden over welk van de twee andere, middeleeuwse dateringsintervallen een correcte datering van het bakproces zou geven. Welk interval ook in overweging genomen zou worden, beide blijken niet mogelijk te zijn. Wel levert deze techniek geslaagde dateringen op voor ovens *in situ*, zoals in Kemzeke, Steendorp en Nijvel⁹⁹.

Hoewel de OSL-analyse van zowel baksteen als mortel geen datering opleverde, biedt het onderzoek in Belsele toch stof voor verder onderzoek. Aangezien de kwartskristallen uit zowel de bakstenen als uit de mortel dezelfde zwakke luminescentie

⁹⁶ Debonne 2014.

⁹⁷ Dit is het onderwerp van een nieuwe studie die in de loop van 2013 werd geïnitieerd aan het

Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium.

⁹⁸ Zie o.a. Lindroos 2012 *et al.*; Pesce & Ball 2012; Pesce *et al.* 2012; Tafaro *et al.* 2013.

⁹⁹ Hus *et al.* 2003; Ech-chakrouni *et al.* 2012.

vertonen, kan het nuttig zijn om na te gaan of de grondstoffen gebruikt in Belsele een geïsoleerd geval uitmaken dan wel een ruimere geografische spreiding hebben. In elk geval moet de toepassing van de OSL-methode in Vlaanderen niet worden afgeschreven. Onderzoek in Brugge (Onze-Lieve-Vrouwekerk) en Oudenaarde (abdijkerk Maagdendale) toont aan dat baksteen (Brugge) en mortel (Oudenaarde) er wel vatbaar zijn voor een OSL-datering.

Een recentelijk ontwikkelde dateringstechniek voor baksteen (en ceramiek van gebakken klei in het algemeen), op basis van rehydroxyleringkinetiek (RHX), kan in de nabije toekomst een volwaardig alternatief bieden¹⁰⁰. Deze techniek is momenteel nog in volle ontwikkeling en werd in deze studie niet toegepast.

De in Belsele toegepaste dateringstechnieken werden verricht op verschillende materialen (hout, baksteen, mortel) en componenten (jaarringen, kwarts kristallen, radiokoolstof, ferromagnetische mineralen). Er zijn dan ook markante verschillen in de impact van de verschillende technieken op het monument. AM is door de blijvende sporen van staalname in het historische metselwerk de meest destructieve techniek. Bovendien moet rekening worden gehouden met de aangehaalde methodologische problemen van AM-datering van verplaatste bouwceramiek, zoals in Belsele. De ingreep van een staalname voor ¹⁴C-datering van kalkmortel is daarentegen minimaal; 27 g kalkmortel uit een voeg volstond om een overigens juiste en vrij precieze datering te verkrijgen. Ook bij een dendrochronologische datering is de impact op het monument beperkt. De accurate en nauwe datering van de dakkap van het schip, bestaande uit ruim 340 onderdelen, werd verkregen aan de hand van 26 monsters. Geboord met een holle boor van 8 mm diameter (andere types hebben een diameter tot 23 mm) is de schade aan de houten onderdelen beperkt. Zowel qua precisie van de datering als ingreep op het monument zijn de ¹⁴C-datering van kalkmortel en de dendrochronologische datering van bouwhout dus de meest aangewezen natuurwetenschappelijke dateringstechnieken van historische bouwmaterialen.

Summary

Waesland brick dated? Scientific dating techniques applied to the Saint-Andrew's and Saint-Ghislenu's church in Belsele (Sint-Niklaas, prov. of East Flanders, Belgium)

Absolute dating of medieval buildings regularly proves to be problematic. Contemporary written sources on the construction history of buildings are often lacking or, when available, are subject to various interpretations. Formal features ('style') do not allow for precise and reliable dating neither. Finally, building materials and construction techniques tend to offer rather crude dates.

However, dating techniques developed in the field of natural sciences are increasingly used within the architectural-historical research of medieval buildings. Tree-ring analysis of construction wood is regularly applied, yielding precise and reliable dates if conditions are favorable. In addition, other techniques are available for dating lime mortar and brick. This article discusses the utility of ¹⁴C dating of lime mortar and the dating of

brick and mortar by use of optically stimulated luminescence (OSL) and archaeomagnetic analysis (AM).

Aforesaid techniques were applied in the parish church of Belsele (Sint-Niklaas, Belgium) (fig. 1-2). The brick built clerestory of the middle aisle, traditionally dated around 1225, offers advantageous conditions to perform these techniques. The middle aisle conserves its original common rafter roof (fig. 3, 5 & 6), allowing to obtain a tree ring dating which in turn might serve as the reference dating when analyzing the mortar and bricks of the masonry underneath. The ¹⁴C-dating of mortar and OSL- and AM-dating of brick were done on the northern longitudinal wall of the middle aisle, at the level of the closed clerestory windows (fig. 4). Ever since the elevation and vaulting of the side aisles in the 16th century, the clerestory of the middle aisle has remained closed off from open air. The 13th-century brick masonry was thus left untouched during restorations in the 20th century.

Based on its constructive typology, the traditional dating around 1225 of the common rafter roof of the middle aisle can be doubted. The curved braces and ashlar pieces and the use of collar-purlins set on the tie-beams rather suggests a construction in the second half of the 13th century (fig. 5-6). Our assumption was confirmed by tree-ring dating (table 1, fig. 7), fixing the felling date of the oak (fig. 8) pieces between 1266 and 1291 A.D. (fig. 9). The chronology of the oak samples taken in the roof showed a remarkable correlation with the recently established chronology of oak in medieval Flanders (table 2). A local origin of the oak in the common rafter roof of Belsele parish church can therefore not be excluded. Indeed, contemporary written sources describe the Waesland of the 13th century as a little cultivated region, still rich in forests. Contrary to the timbers from the middle aisle, those from the rafter roof of the choir and transept display much wider tree-rings (fig. 7). Therefore, less growth rings could be measured on the core samples, and as a consequence these timbers could not be dated by dendrochronology. A characteristic shared by timbers from the middle aisle, choir and transept are the many (similar) toolmarks (from saws and adzes) that can be observed (fig. 10).

The ¹⁴C-analysis (fig. 14) of lime mortar in the brick masonry underneath the roof (fig. 11-13) was not performed on organic inclusions, but on the atmospheric carbon dioxide absorbed in the mortar as it dries and hardens (fig. 15, equations [1]-[3]). A customized preparation technique (fig. 19-20) was applied to prepare the mortar samples, in order to distinguish between the fossil rock carbonate and the anthropogenic carbonate in the mortar (fig. 18). The ¹⁴C dating of the lime mortar (fig. 21-22) – 1260-1295 A.D. (95% probability) – coincides with the tree ring dating of the roof (1266-1291), thus confirming the simultaneity of the roof and the brick masonry on which it rests.

From the same wall, 12 bricks were sampled as were 10 more fragments of loose bricks, in order to determine the inclination of the Earth's magnetic field (fig. 23-24, table 4-5) at the time of firing. The archaeomagnetic dating (AM) produced two possible time-intervals for the firing of the bricks: 991-1185 A.D. or 1460-1547 A.D. (95% probability) (fig. 27). However, both of the obtained dates did not coincide with the actual age of the brick masonry

in the second half of the 13th century. Still, AM-analysis showed the bricks to have been fired positioned on their stretcher side. Such stacking of bricks has been recognized in the oldest excavated brick kilns in Flanders, dating to the 14th century, and remained in use until the automation of brick production in the 20th century.

Prior to actual dating of brick by use of OSL (fig. 28), the luminescence signal of quartz was assessed out of two brick samples and mortar samples from the southern longitudinal wall of the middle aisle (fig. 11-12). The luminescence signal in both types of samples, however, proved to be too weak, not allowing further dating. This probably indicates that the aggregates in the bricks and the mortar have the same geological origin. Fortunately a more optimistic picture is emerging from ongoing OSL-analyses, performed on other medieval buildings in Flanders, which revealed an adequate OSL sensitivity of the quartz in order to obtain a reliable date for the construction of the masonry. However, up to now it remains unclear whether the source of aggregates used at Belsele represents an isolated occurrence or whether its geographical spread was more extensive.

It can be stated that apart from tree ring dating, ¹⁴C-dating of atmospheric carbon dioxide in lime mortar is the most preferable of absolute dating techniques (fig. 29). In favorable circumstances, it can provide precise dates for the construction of brick masonry. Also, the impact on the original built structure is minimal; only a few grams of lime mortar are sufficient to conduct dating analysis.

Despite the failed attempt in Belsele, OSL-dating remains a possible absolute dating technique in Flanders, albeit dependent on the composition and physical properties of bricks. Although a theoretical framework for dating bricks contained in masonry by use of AM exists, to date, this technique may fail as the assumptions made are not always met. Indeed, it is assumed that during their production the bricks were stapled horizontally or vertically and that the oven floor was horizontal. Furthermore, a possible correct dating would require a considerable number of brick samples, causing a destructive impact on the original built substance. On the other hand, AM-analysis may offer insights into techniques of pre-industrial brick production.

To conclude, the incorporation and comparison of different scientific dating techniques in this research project on the medieval parish church of Belsele, provided more insight in the possibilities and limitations of each dating technique. Furthermore, the traditional but poorly founded dating of the brick clerestory around 1225 can now be rejected. The brick clerestory and roof of the middle aisle are of a younger age, being the final third of the 13th century.

Bibliografie

- ABRAHAMSEN N., JACOBSEN U., MEJDAHL U., MEJDAHL V. 1997: Brick kiln from SW Jutland: The kiln, historical outline of brick production and farm building in Jutland, magnetic and luminescence dating of the kiln, *Iskos* 11, 61–73.
- AITKEN M.J. 1974²: *Physics and archaeology*, Oxford.
- AITKEN M. 1985: *Thermoluminescence dating*, London.
- ARASON P. & LEVI S. 2010: Maximum likelihood solution for inclination-only data in paleomagnetism, *Geophysical Journal International* 182, 753–771.
- BAILLIFF I.K. & HOLLAND N. 2000: Dating bricks of the last two millennia from Newcastle upon Tyne: a preliminary study, *Radiation Measurements* 32, 615–619.
- BAILLIFF I.K., BLAIN S., GRAVES C.P., GURLING T. & SEMPLE S. 2010: Uses and recycling of brick in medieval and Tudor English buildings: insights from the application of luminescence dating and new avenues for further research, *The Archaeological Journal* 167, 165–196.
- BAILLIE M.G.L. 1995: *A slice through time. Dendrochronology and precision dating*, London.
- BATT C.M. 1997: The British archaeomagnetic calibration curve: an objective treatment, *Archaeometry* 39, 153–168.
- BERNARD V. 1998: *L'homme, le bois et la forêt dans la France du Nord entre le Mésolithique et le Haut Moyen-Age*, BAR International Series 733, Oxford.
- BLAIN S. 2011: *Les terres cuites architecturales des églises du haut Moyen Age dans le nord-ouest de la France et le sud-est de l'Angleterre. Application de la datation par luminescence à l'archéologie du bâti*, BAR International Series 2189, Oxford.
- BOUVIER A., GUIBERT P., BLAIN S. & REYNAUD J.-F. 2012: Interdisciplinary study of the early building phases of St Irénée's church (Lyons, France): the contribution of luminescence dating, *Archéosciences* 37, 155–171.
- BRIDEN J.C. & WARD M.A. 1966: Analysis of magnetic inclinations in borecores, *Pure and Applied Geophysics* 63, 133–152.
- BUCUR I. 1994: The direction of the terrestrial magnetic field in France during the last 21 centuries, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 87, 95–109.
- COOMANS TH. 2001: L'architecture médiévale des ordres mendiants (franciscains, dominicains, carmes et augustins) en Belgique et aux Pays-Bas, *Revue belge d'Archéologie et d'Histoire de l'Art* 70, 3–III.
- COOMANS TH. 2002: Le bâtiment des moines de l'ancienne abbaye cistercienne du Val Saint-Lambert (1233–1234): analyse archéologique et typologique. In: DE JONGE K. & VAN BALEN K. (eds.), *Preparatory Architectural Investigation in the Restoration of Historical Buildings*, Leuven, 143–162.
- COOMANS TH. 2006a: Saint-Christophe à Liège: la plus ancienne église médiévale du mouvement béguinal, *Bulletin Monumental* 164.4, 359–376.
- COOMANS TH. 2006b: De oudste dakconstructie in de Leuvense binnenstad: bouwhistorisch onderzoek in de predikherenkerk (prov. Vlaams-Brabant), *Relicta. Archeologie, Monumenten- en Landschapsonderzoek in Vlaanderen* 1, 183–212.
- DALY A. 2007: *Timber, Trade and Tree-rings. A dendrochronological analysis of structural timber in Northern Europe, c. AD 1000 to c. AD 1650*, onuitgegeven verhandeling University of Southern Denmark, Copenhagen.
- DE BELIE A. 1997: *De Boudelo abdij, archeologisch onderzoek*, Sint-Niklaas.

DEBONNE V. 2014: De gotische Onze-Lieve-Vrouwbasiliek in Tongeren. Nieuwe inzichten in de bouwgeschiedenis. In: ERVYNCK A. (red.), *Titel, Relicta Monografieën X*, Brussel, xxx-xxx.

DEBONNE V. & OOST T. 2008: Bakstenen en profielbakstenen uit de cisterciënzerabdij van Boudelo. In: COOMANS TH. & VAN ROYEN H. (eds.), *Medieval Brick Architecture in Flanders and Northern Europe: the Question of the Cistercian Origin. Middeleeuwse baksteenarchitectuur in Vlaanderen en Noord-Europa*, Novi Monasterii 7, Koksijde, 279-292.

DEBONNE V. & HANECA K. 2011: Baksteen en boomringen: een verfijnde bouwchronologie van het hallenkoor van de Onze-Lieve-Vrouwkerk in Damme (prov. West-Vlaanderen), *Relicta. Archeologie, Monumenten- en Landschapsonderzoek in Vlaanderen* 7, 67-100.

DEMEY A. 1985: De Sint-Andreas-en-Gislenuskerk te Belsele. Archeologische en kunsthistorische studie, *Annalen van de Koninklijke Oudheidkundige Kring van het Land van Waas* 88, 5-96.

DEMEY A. 1986: De Sint-Andreas-en-Gislenuskerk te Belsele. Archeologische en kunsthistorische studie (Deel 2), *Annalen van de Koninklijke Oudheidkundige Kring van het Land van Waas* 89, 5-81.

DEMEY A. & DE KEGEL A. 1991: *Duizend jaar oud, zes stijlen rijk. De Sint-Andreas-en-Gislenuskerk te Belsele*, Gent.

DE MULDER G., HAYEN R., BOUDIN M., VAN DEN BRANDE T., DECQ L., SALAS BURGUERA M., RAMIS D., BORMS H. & VAN STRYDONCK M. 2014: ¹⁴C dating and material analysis of the lime burial of Cova de Na Dent (Mallorca, Spain), *Radiocarbon* 56.2, 387-398.

DE VRIES D.J. 1994: *Bouwen in de late Middeleeuwen: Stedelijke architectuur in het voormalige Over-en Nedersticht*, Utrecht.

DE VRIES D.J. 2000: Vergelijkend natuurwetenschappelijk onderzoek, *Bulletin van de Koninklijke Nederlandse Oudheidkundige Bond* 99.3, 74-84.

DULLER G.A.T. 2008: *Luminescence Dating: guidelines on using luminescence dating in archaeology*, Swindon.

DUSAR M., DREESEN R. & DE NAEYER A. 2009: *Renovatie & restauratie. Natuursteen in Vlaanderen, versteend verleden*, Mechelen.

ECH-CHAKROUNI S., HUS J. & SPASSOV S. 2012: Etude archéomagnétique d'un grand four de tuilier mis au jour sur la Grande Place de Nivelles (Brabant Wallon), *Archaeologia Mediaevalis* 35, 141-142.

ECKSTEIN D., BAILLIE M.G.L. & EGGER H. 1984: Dendrochronological dating. In: *Handbooks for Archaeologists No. 2*, Strasbourg, 55.

ECKSTEIN D. & WRÖBEL S. 2007: Dendrochronological proof of origin of historic timber - retrospect and perspectives. In: HANECA K., VERHEYDEN A., BEECKMAN H., GÄRTNER H., HELLE G. & SCHLESER G. (red.), *Proc. of the Dendrosymposium 2006, April 20th-22nd, Tervuren, Belgium*, Schriften des Forschungszentrums Jülich, reihe Umwelt/Environment 74, 8-20.

EISSING T. 2009: *Kirchendächer in Thüringen und den südlichen Sachsen-Anhalt. Dendrochronologie - Flösserei - Konstruktion*, Arbeitsheft des Thüringischen Landesambtes für Denkmalpflege und Archäologie 32, Erfurt.

EISSING T. & DITTMAR C. 2011: Timber transport and dendro-provenancing in Thuringia and Bavaria. In: FRAITURE P. (ed.), *Tree rings, Art, Archaeology. Proceedings of an international conference*, Scientia Artis 7, Brussel, 137-149.

FEUILLAT F., DUPOUEY J.L., SCIAMA D. & KELLER R. 1997: A new attempt at discrimination between *Quercus petraea* and *Quercus robur* based on wood anatomy, *Canadian Journal of Forest Research* 27, 343-351.

GALLET Y., GENEVEY A. & LE GOFF M. 2002: Three millennia of directional variation of the Earth's magnetic field in western Europe as revealed by archaeological artefacts, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 131, 81-89.

GOEDICKE C. 2003: Dating historical calcite mortar by blue OSL: results from known age samples, *Radiation Measurements* 37, 409-415.

GOEDICKE C. 2011: Dating mortar by optically stimulated luminescence: a feasibility study, *Geochronometria* 38.1, 42-49.

GOULPEAU L. 1984: Les possibilités de l'archéomagnétisme des matériaux déplacés. In: Datation-caractérisation des céramiques anciennes, *Journal of the European Study Group on Physical, Chemical and Mathematical Techniques Applied to Archaeology - PACT* 10, 191-202.

GUELI A.M., STELLA G., TROJA S.O., BURRAFATO G., FONTANA D., RISTUCCIA M., ZUC-CARELLO A.R. 2010: Historical buildings: luminescence dating of fine grains from bricks and mortar, *Nuovo Cimento B* 5-6, 719-729.

GULLENTOPS F. & WOUTERS L. 1996: *Delfstoffen in Vlaanderen*, Brussel.

HANECA K. 2010a: Het houten archief in de koepel. Dendrochronologisch onderzoek van de kap-structuur. In: BUIJS J. & BERGMANS A. (red.), *Een belvedere aan de Schelde. Paviljoen De Notelaer in Hingene (1792-1797)*, Relicta Monografieën 5, Brussel, 285-291.

HANECA K. 2010b: *Verslag dendrochronologisch onderzoek. Kap van de Onze-Lieve-Vrouwekerk te Kortrijk (prov. West-Vlaanderen)*, Rapporten natuurwetenschappelijk onderzoek VIOE. (ongepubliceerde reeks)

HANECA K., BOEREN I., VAN ACKER J. & BEECKMAN H. 2006: Dendrochronology in suboptimal conditions: tree rings from medieval oak from Flanders (Belgium) as dating tools and archives of past forest management, *Vegetation History and Archaeobotany* 15.2, 137-144.

HANECA K., ČUFAR K. & BEECKMAN H. 2009: Oaks, tree-rings and wooden cultural heritage: a review of the main characteristics and applications of oak dendrochronology in Europe, *Journal of Archaeological Science* 36.1, 1-11.

HANECA K. & DEBONNE V. 2012: Precise tree-ring dating of building activities despite the absence of bark: A case-study on medieval church roofs in Damme, Belgium, *Dendrochronologia* 30.1, 23-34.

HASLINGHUIS E.J. & JANSE H. 2005⁵: *Bouwkundige termen. Verklarend woordenboek van de westerse architectuur- en bouwgeschiedenis*, Leiden.

HAYEN R. 2013: *Belsele, Sint-Andreas-en – Ghislenuskerk. Rapportering mortelanalyse*. (Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium, ongepubliceerd verslag)

HEINEMEIER J., RINGBOM Å., LINDROOS A. & SVEINBJÖRNSDÓTTIR Á. E. 2010: Successful AMS ¹⁴C dating of non-hydraulic lime mortars from the medieval churches of the Åland islands, Finland, *Radiocarbon* 52.1, 171-204.

HOFFSUMMER P. 1995: *Les charpentes de toiture en Wallonie, typologie et dendrochronologie, (XIe-XIXe siècle)*, Etudes et documents, monuments et sites, Namur.

HOFFSUMMER P. 2007: The evolution of roofing in Northern France and Belgium from the 11th to the 18th century as revealed by dendrochronology. In: HANECA K., VERHEYDEN A., BEECKMAN H., GÄRTNER H., HELLE G. & SCHLESER G.H. (red.), *TRACE - Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology, Volume 5. Proceedings of the Dendrosymposium 2006, april 20th-22nd, Tervuren, Belgium*, Schriften des Forschungszentrum Jülich, Reihe Umwelt/Environment 74, Jülich, 21-27.

HOFFSUMMER P. (ed.) 2009: *Roof Frames from the 11th to the 19th century. Typology and Development in Northern France and in Belgium*, Architectura Medii Aevi 3, Turnhout.

- HOLLSTEIN E. 1980: *Mitteleuropäische Eichenchronologie, Trierer dendrochronologische Forschungen zur Archäologie und Kunstgeschichte*, Trierer Grabungen und Forschungen Bd. 11, Mainz am Rhein.
- HOUBRECHTS D. 2000: Dendrochronologie en de handel in hout, *Berichten en Rapporten over het Antwerps Bodemonderzoek en Monumentenzorg* 4, 99–114.
- HUS J., ECH-CHAKROUNI S., JORDANOVA D. & GEERAERTS, R. 2003: Archaeomagnetic investigation of two Mediaeval brick constructions in North Belgium and the magnetic anisotropy of bricks, *Geoarcheology: An International Journal* 18.2, 225–253.
- HUS J. & GEERAERTS R. 2005: Origin of deviations between the remanent magnetization and inducing geomagnetic field direction in kilns and implications on archaeomagnetic dating, *Studia Geophysica et Geodaetica* 49, 233–253.
- JANSE H. 1998: *Van aaks tot zweep. Historische handgereedschappen in de Nederlandse en Vlaamse bouwwereld*, Zeist.
- JANSE H. & DEVLIEGHER L. 1962: Middeleeuwse bekappingen in het vroegere graafschap Vlaanderen, *Bulletin van de Koninklijke Commissie voor Monumenten en Landschappen* 13, 301–380.
- LANGOUET L., GOULPEAU L. & LANOS P.H. 1986: Les récents progrès dans l'étude de l'archéomagnétisme des matériaux déplacés en France, *Journal of the European Study Group on Physical, Chemical and Mathematical Techniques Applied to Archaeology - PACT* 15, 177–185.
- LANOS P. 1987: *Archéomagnétisme des matériaux déplacés. Application à la datation des matériaux de construction d'argile cuite en archéologie*, onuitgegeven eindverhandeling Université de Rennes I.
- LANOS P. 1994: Pratiques artisanales des briquetiers et archéomagnétisme des matériaux d'argile cuite, une histoire de positions de cuisson, *Histoire & Mesure* 9.3-4, 287–304.
- LANOS P. 2001: L'approche bayésienne en chronométrie: application à l'archéomagnétisme. In: BARRANDON J.N. & MICHEL V. (eds.), *Datation, XXIe rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes*, Antibes, 113–139.
- LANOS P. 2004: Bayesian inference of calibration curves: application to archaeomagnetism. In: BUCK C. E. & MILLARD A.R. (eds.), *Tools for Constructing Chronologies: Crossing Interdisciplinary Boundaries* 177, Londen, 43–82.
- LANOS P., LE GOFF M., KOVACHEVA M. & SCHNEPP E. 2005: Hierarchical modelling of archaeomagnetic data and curve estimation by moving average technique, *Geophysical Journal International* 160, 440–476.
- LE GOFF M., GALLET Y., GENEVEY A. & WARMÉ N. 2002: On archeomagnetic secular variation curves and archeomagnetic dating, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 134, 203–211.
- LEHOUCK A. 2008: Gebruik en productie van baksteen in de regio Veurne van circa 1200 tot circa 1550. In: COOMANS TH. & VAN ROYEN H. (eds.), *Medieval Brick Architecture in Flanders and Northern Europe: the Question of the Cistercian Origin. Middeleeuwse baksteenarchitectuur in Vlaanderen en Noord-Europa*, Novi Monasterii 7, Koksijde, 203–232.
- LEUNG P.L., TANG Q., LI M. & ZHANG C.X., 2005: The preliminary application of OSL in comparison with TL for authentication of ancient Chinese bricks, *Radiation Measurements* 40, 1–4.
- LINDROOS A., RINGBOM Å., HEINEMEIER J., KAISTI R., SJÖBERG P., SONCK-KOOTA P., RANTA H. 2012: Lime lumps as a material for mortar dating. In: *2nd International Mortar Dating Workshop, 17-21 September 2012, Mallorca-Spain. Program & abstracts*, Manacor – Brussel, 16.
- MCFADDEN P.L. & REID A.B. 1982. Analysis of palaeomagnetic inclination data, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 69.2, 307–319.

MILES D. 2006: Refinements in the interpretation of tree-ring dates for oak building timbers in England and Wales, *Vernacular Architecture* 37, 84-96.

NADEAU M.-J., GROOTES P.M., SCHLIECHER M., HASSELBERG P., RIECK A. & BITTERLING M. 1998: Sample throughput and data quality at the Leibniz-Labor AMS facility, *Radiocarbon* 40, 239-245.

NOËL M. & BATT C. 1997: A method for correcting geographically separated remanence directions for the purpose of archaeomagnetic dating, *Geophysical Journal International* 102, 753-756.

PESCE G.L. & BALL R.J. 2012: Dating of old lime based mixtures with the “pure lime lumps” technique. In: NAWROCKA D. (red.), *Radiometric dating*, InTech [online], <http://cdn.intechopen.com/pdfs/36649.pdf>, 21-38. (geraadpleegd 28/07/14)

PESCE G.L., BALL R.J., QUARTA G. & CALCAGNILE L. 2012: Identification, extraction, and preparation of reliable lime samples for ¹⁴C dating of plasters and mortars with the “pure lime lumps” technique, *Radiocarbon* 54.3-4, 933-942.

SAPIN C., BAYLÈ M., BÜTTNER S., GUIBERT P., BLAIN S., LANOS P., CHAUVIN A., DUFRESNE P. & OBERLIN C. 2008: Archéologie du bâti et archéométrie au Mont-Saint-Michel, nouvelles approches de Notre-Dame-sous-Terre, *Archéologie Médiévale* 38, 71-122.

STENVERT R. & VAN TUSSENBROEK G. (red.), 2007: *Inleiding in de bouwhistorie. Opmeten en onderzoeken van oude gebouwen*, Utrecht.

TACK G., VAN DEN BREMT P. & HERMY M. 1993: *Bossen van Vlaanderen. Een historische ecologie*, Leuven.

TAFARO V., PESCE G.L., PORTALE D., VECCHIATTINI & BALL R. 2013: Radiocarbon dating of mortars from places of worship. Applications of the “pure lime lumps” technique in archaeological research. In: *¹⁴C and Archaeology. 7th International Symposium, 8-12 April, Ghent, Belgium. Book of Abstracts*, Gent, 22.

THELLIER, E. 1936: Aimantation des briques et inclinaison du champ magnétique terrestre, *Annales de l'Institut de physique du Globe* 14, 65-70.

THELLIER E. 1981: Sur la direction du champ magnétique terrestre en France durant les deux derniers millénaires, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 24, 89-132.

THIRON J. 2010: Stekene. Meer dan 800 jaar productie van bouwkeramiek in een Vlaams dorp. In: OOST T. & VAN DE VOORDE E. (eds.), *In vuur en vlam! Omgaan met baksteenerfgoed in Vlaanderen*, Jaarboek voor Geschiedenis en Volkskunde. Monografie 1, Antwerpen, 41-61.

THUYSBAERT P. 1913: *Het Land van Waes. Bijdrage tot de geschiedenis der landelijke bevolking in de XIXe eeuw*, Kortrijk, 1913.

VAN DEN BREMT P. & DE MEIRSMAN R. 2010: De Stroopers in het vizier!, *M&L. Monumenten, Landschappen & Archeologie* 29.4, 21-64.

VANDERVEE A. 1953: Het Land van Waas als geologisch landschap, *Annalen van de Oudheidkundige Kring van het Land van Waas* 59.1, 1-112.

VAN EENHOOGHE D. 2009: De middeleeuwse sporenkappen van de Onze-Lieve-Vrouwekerk in Brugge, *M&L. Monumenten, Landschappen & Archeologie* 28.2, 21-45.

VAN HOVE R. (red.) 1994: Archeologisch onderzoek in de H.-Kruiskerk te Vrasene. Romaanse driebeukige kerk (1153-1183) en voor-Romaanse bewoningssporen, *Bijdragen van de Archeologische Dienst Waasland* 2, 9-172.

VAN NAEMEN F. 1884: Chronique de François-Joseph de Castro, *Annalen van de Oudheidkundigen Kring van het Land van Waas* 9, 243-397.

VAN NAEMEN F. 1885: Chronique de François-Joseph de Castro, *Annalen van de Oudheidkundigen Kring van het Land van Waas* 10, 107-202.

VAN STRYDONCK M. 1992: *Radiokoolstof: een maat voor het verleden*, Brussel.

VAN STRYDONCK M., DUPAS M. & KEPPENS E. 1989: Isotopic fractionation of oxygen and carbon in lime mortar under natural environmental conditions, *Radiocarbon* 31.3, 610-618.

VAN STRYDONCK M. & VAN DER BORG K. 1991: The construction of a preparation line for AMS-targets at the Royal Institute for Cultural Heritage Brussels, *Bulletin van het Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium* 23, 228-234.

VAN STRYDONCK M., NELSON D.E., CROMBÉ P., BRONK RAMSEY C., SCOTT E.M., VAN DER PLICHT J. & HEDGES R.E.M. 1999: What's in a ¹⁴C date. In: EVIN J., OBERLIN C., DAUGAS J.-P. & SALLES J.-F. (eds.), *3rd Int. Symposium 14C and Archaeology*, Mémoires de la Société Préhistorique Française 26, Supplément de la Revue d'Archéométrie, Paris, 433-448.

VAN STRYDONCK M., BOUDIN M., DECQ L., VAN DEN BRANDE T., BORMS H., RAMIS D. & DE MULDER G. 2011: AMS 14C Dating of Balearic lime burials, *Radiocarbon* 53.4, 563-574.

VAN TUSSENBROEK G. 2008: Geheimschrift in oude constructies. Amsterdam en de internationale houthandel in de 17de en 18de eeuw, *Nieuwsbrief Stichting Bouwhistorie Nederland* 45, 37-51.

VIEILLEVIGNE E., GUIBERT P., ZUCCARELLO A.R. & BECHTEL F. 2006: The potential of optically stimulated luminescence for medieval building. A case study at Termez, Uzbekistan, *Radiation Measurements* 41, 991-994.

VIEILLEVIGNE E., GUIBERT P. & BECHTEL F. 2007: Luminescence chronology of the medieval citadel of Termez, Uzbekistan: TL dating of bricks masonries, *Journal of Archaeological Science* 34, 1402-1416.

VOSSEN K. 1942: Ontstaan der parochies in het Land van Waas, *Annalen van den Oudheidkundigen Kring van het Land van Waas* 53.1, 5-133.

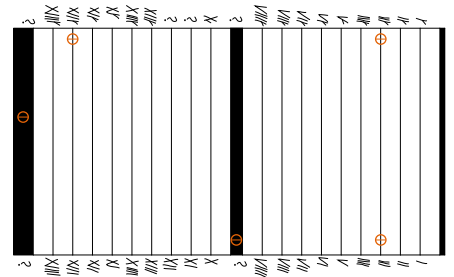
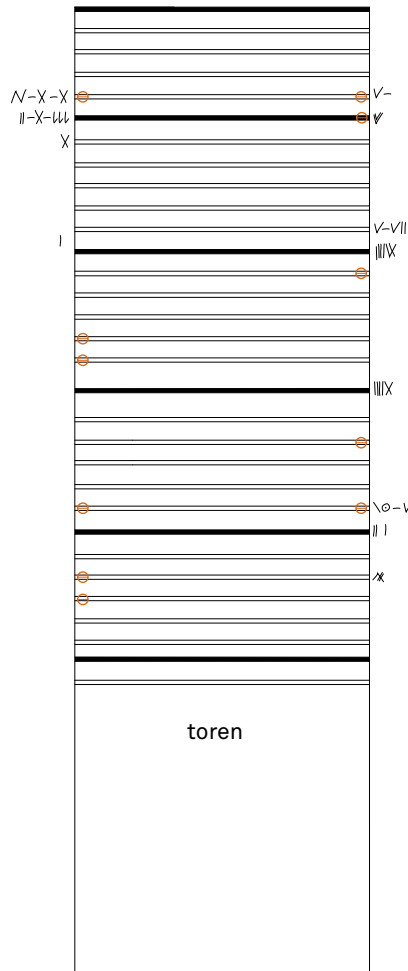
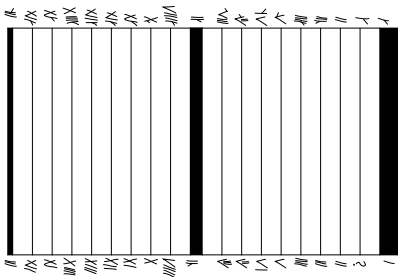
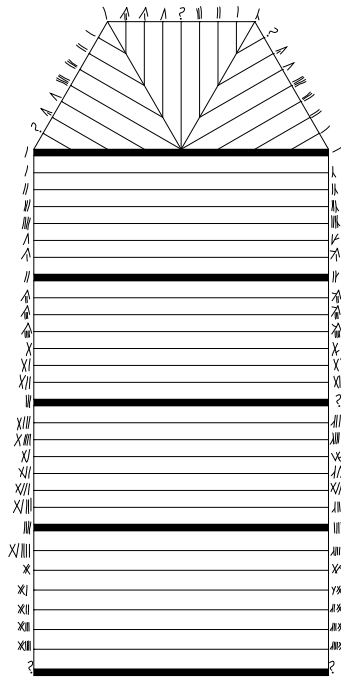
WILSON M.A., CARTER M.A., HALL C., HOFF W.D., INCE C., SAVAGE S.D., MCKAY B. & BETTS I.M. 2009: Dating fired-clay ceramics using long-term power law rehydroxylation kinetics, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 465.2108, 2407-2415.

WETS TH. 2008: Vroeg baksteengebruik in Brugge. In: COOMANS TH. & VAN ROYEN H. (eds.), *Medieval Brick Architecture in Flanders and Northern Europe: the Question of the Cistercian Origin. Middeleeuwse baksteenarchitectuur in Vlaanderen en Noord-Europa*, Novi Monasterii 7, Koksijde, 147-162.

BIJLAGE I

Schematisch overzicht van de dakkapen van de parochiekerk van Belsele met aanduiding van telmerken, handelsmerken, vlotverbindingen en de locaties van de monsternamen voor het dendrochronologisch onderzoek.

Simplified plan of the roofs of the parish church of Belsele, with the exact location of carpenter's and trade marks, rafting joints and the sampling spots for the dendrochronological analysis.



⊗ monster voor dendrochronologisch onderzoek
sample for dendrochronological analysis