

VOORKOMEN EN GEBRUIK VAN KALKTUF IN ZUID-LIMBURG

1

In het natuurreservaat van Zammelen, bij Vliermaal (Kortessem), zijn we getuige van een actueel geologisch proces: de vorming van kalktuf of travertijn. Het kalkrijke water dat hier langs de rand van de Mombeekvallei uit verschillende kwellen opborrelt, heeft niet alleen aanleiding gegeven tot het ontstaan van kwelmoerassen maar ook tot de plaatselijke vorming van relatief uitgestrekte poreuze kalkkorsten. De oorsprong van het hoge kalkgehalte van het water moet gezocht worden in de kalkrijke geologische formaties die hier dagzomen of op geringe diepte onder de leem voorkomen. Fossiele kalktufafzettingen uit het Holoceen komen frequent voor in België, maar actieve precipitatie van kalktuf zijn eerder zeldzaam en vooral beperkt tot de Condrozstreek en Lotharingen. De kalktuf van Zammelen behoort tot de weinige nu nog actieve afzettingen in Vlaanderen. Kleinere, zeer plaatselijke actieve carbonaatafzettingen komen ook nog voor langs uitsijpelingen in diepe weginsnijdingen bij Borgloon. Kalktuf duikt ook regelmatig op als bouwsteen in oude monumenten van Zuid-Limburg. Naast algemene informatie over de ontstaanswijzen van kalktuf, wil dit artikel vooral dieper ingaan op de geologische, mineralogische en biologische kenmerken van de recente kalktuf van Zammelen. Tenslotte wordt een vergelijking gemaakt met de fossiele kalktuf uit de oude monumenten van Haspengouw.

Roland Dreesen
Graaf de Brigodestraat, 40
3500 Hasselt

An Janssen
Afdeling Fysico-chemische Geologie K.U. Leuven
Celestijnenlaan, 200 C
3001 Heverlee

Definitie, vorming en classificatie

Kalktuf en de hiermee verwante en beter gekende travertijn, behoren tot de terrestrische (of niet-mariene) carbonaten of kalkstenen. Deze vormen zich in bronnen, meren, rivieren en op hellingen door precipitatie van calciumcarbonaat (CaCO_3 of kalk) uit oververzadigde waters. De reactie volgens dewelke deze carbonaatprecipitatie gebeurt, is: $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightleftharpoons \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$.

Het bicarbonaat (HCO_3^-) dat in de waters aanwezig is, is afkomstig van kalksteen, kalkrijke zanden, mergels en krijt, die in de ondergrond voorkomen en die opgelost worden in het grondwater. De oververzadiging die leidt tot precipitatie van kalk, wanneer de waters aan de oppervlakte komen, is het gevolg van een vermindering van de CO_2 -concentratie in het water. Hierdoor schuift de reactie op naar rechts en zal het carbonaat uit het water neerslaan. Het CO_2 -verlies kan een

gevolg zijn van verschillende factoren die meestal samenwerken tijdens het hele proces. Zo zal het water in de ondergrond een hogere partiële CO_2 -druk hebben dan de atmosferische CO_2 . Hierdoor zal de CO_2 vanuit het water naar de atmosfeer ontsnappen vanaf het ogenblik dat het water aan de oppervlakte komt. Verder zal CO_2 vanuit het water ontgassen naar de atmosfeer, bij turbulentie van het water in stroomversnellingen of in watervallen. Ook door opwarming van het water onder invloed van de zon zal CO_2 -verlies optreden. Alle genoemde fysisch-chemische factoren zorgen voor een anorganische precipitatie. Maar ook biologische factoren spelen een niet te onderschatten rol. Zo zullen waterplanten en andere organismen voor hun fotosynthese CO_2 en HCO_3^- uit het water opnemen, om hun organisch materiaal op te bouwen. Hierdoor veroorzaken zij een plaatselijke oververzadiging van het water, met precipitatie van carbonaat op deze organismen als gevolg. Deze neerslag is dus bio-

(blz.10) **Figuur 2** : Kwel en aansluitende natte zone (kwelmoeras) met vorming van kalktuf aan de voet van het hellingsbos van Zammelen (opname december 1997).

logisch geïnduceerd. Toch is fotosynthese niet de enige manier van de organismen om CaCO_3 -precipitatie te veroorzaken. Bepaalde algen (voornamelijk blauw-groenwieren of cyanobacteriën) die veelvuldig voorkomen in kalkrijke waters, kunnen een actieve rol spelen in de kalktuf- en travertijnvorming door het vangen en binden van kleine carbonaatkorreltjes of door actieve intra-, inter- en extracellulaire CaCO_3 -precipitatie rond hun filamenten. Diatomaceën (kiezelwieren) kunnen net als de algen, carbonaatpartikels vangen en binden. Mossen (Bryophyta) daarentegen doen dienst als meer passieve precipitatie-oppervlakken voor het carbonaat en als groeisubstraat voor de algen en diatomaceën. Toch is de exacte invloed van alle aanwezige organismen nog niet volledig gekend. Belangrijk is wel dat anorganisch en organisch geïnduceerde precipitatie beiden een min of meer belangrijke rol zullen spelen in de vorming van kalktuf of travertijn.

Het onderscheid tussen kalktuf en travertijn is niet altijd duidelijk, maar kan als volgt geformuleerd worden. Travertijn is een eerder harde en weinig poreuze kalksteen, gevormd door zowel anorganische als organische (algaire en bacteriële) precipitatie van CaCO_3 . Meestal vormt deze zich in snelstromende waters, in watervallen of in warmwaterbronnen, waar weinig tot geen macrofyta (hogere planten) aanwezig zijn. Prachtige voorbeelden van travertijnafzettingen in warmwaterbronnen zijn o.a. de terrasvormige poelen van de Mammoth Hot Springs in het Yellowstone National Park (USA) en deze van Pamukkale in Turkije. Het belangrijkste kenmerk is dikwijls een fijne horizontale laminatie (Bates en Jackson, 1987). De naam "travertijn" is afkomstig van het Italiaanse "travertino", dat op zijn beurt afstamt van het Latijnse "lapis Tiburtinus": dit is de steen van Tibur, nu Tivoli, een klein stadje nabij Rome, waar uitgebreide travertijn-afzettingen voorkomen die reeds ten tijde van de Romeinen werden uitgebaat (Chafetz en Folk, 1984). Kalktuf of bronnenkalk is de poreuze en sponsachtige variëteit van travertijn en wordt gevormd door incrustatie (omkorsting) van algen, bacteriën, macrofyta, mossen en invertebraten, die duidelijk sporen in het gesteente nalaten (Bates en Jackson, 1987). De naam kalktuf komt van het Latijnse "tofus", dat door de Romeinen gebruikt werd als aanduiding van een korrelige witte afzetting (Ford en Pedley, 1996). Kalktuf dient echter niet verward te worden met vulkanische tuf of tufsteen, die wordt

opgebouwd uit vulkanische assen of z.g. pyroclastisch materiaal.

In de internationale literatuur bestaan verschillende classificatiesystemen voor deze zoetwatercarbonaten, die op uiteenlopende criteria gebaseerd zijn. Een eerste onderscheid wordt gemaakt tussen z.g. "meteogene" of koudwaterafzettingen en "thermogene" afzettingen of carbonaten geassocieerd met hydrothermale (warmwater) activiteit (Ford en Pedley, 1996). Verdere onderverdeling gebeurt aan de hand van de geomorfologische context van de carbonaatafzetting (Pentecost en Viles, 1994): hierbij onderscheidt men bron-, rivier-, meer- en moerasafzettingen en afzettingen op hellingen die ook "crons" (Lotharingse dialect) worden genoemd. Deze "crons" zijn kegelvormige structuren gevormd door incrustatie van planten in kleine beekjes op hellingen (Van Oye en Hubert, 1937). De type afzettingen van deze structuren bevinden zich in de provincie Luxemburg. Rivier-travertijnen vormen zich door afzetting van CaCO_3 in de rivierbedding, waarbij alles wat in het water aanwezig is bedekt wordt door een dunne carbonaatlaag. In deze rivier kunnen gecrusteerde planten kleine dammetjes met watervalletjes en stroomversnellingen vormen, waarachter diepere poelen of meertjes voorkomen. Een prachtig voorbeeld hiervan vormen de afgedamde travertijnmeren in het Nationaal Park van Plitvice in Kroatië. Lacustriene of meerafzettingen vormen zich meestal langs de oever of als fijne kalkmodder op de bodem. Een andere classificatie baseert zich op de in de kalktuf aangetroffen organismen: zo kan men algaire, mos-, bacteriële, Chironomiden- (met larven van dansmuggen) en diatomaceëntuf onderscheiden.

De actieve kalktuf van Zammelen

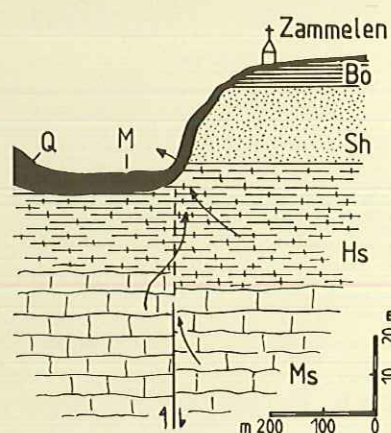
Ondanks het feit dat dit geologisch proces hier reeds tientallen jaren actief is, bleef de actuele vorming van kalktuf in de Mombeekvallei vrijwel onopgemerkt en werd dit fenomeen slechts recent voor het eerst vermeld (Boogaerts, 1997). In het kleine, maar prachtige Haspengouwse natuurreservaat van Zammelen (Figuur 1) ontspringen verschillende kwellen aan de voet van een steil hellingsbos, aan de rand van de Mombeekvallei (Figuur 2). In het hellingsbos verraden Daslook, en de Wijngaardslak, de aanwezigheid van

De in de tabel opgenomen parameters geven belang-



Figuur 1 : Localisatiekaartje van het site van Zammelen. De gekleurde zone komt overeen met het gebied van het kleine natuurreservaat van Zammelen. Punten 1 en 2 zijn de plaatsen van staalname van de bronwaters (zie ook Tabel 1). Punt 1 is de locatie van de actuele kalktufvorming in de Molenbeek-Mombeekvallei. De zwarte lijn verwijst naar de geologische doorsnede op Figuur 4.

Figuur 3 : Ontsluiting van kalktuf met duidelijk herkenbare geïncrusteerde takjes onder een dunne deklaag van dode bladeren. Rand van kwelmoeras van Zammelen (zie Figuur 2).



Figuur 4 : Geologische ZW-NO-doorsnede van het site van Zammelen. De pijltjes verwijzen naar het vermoedelijke traject van het kalkrijke grondwater. Bo : kleien van de Formatie van Borgloon; Sh : fijne zanden van de Formatie van Sint-Huibrechts-Hers; Hs : mergels van de Formatie van Heers; Ms : krijt van de Formatie van Maastricht; Q : Quartaire leemlaag; M : Molenbeek-Mombeek.

Tabel 1 : Vergelijking der resultaten van de in-situ analyses (fysisch-chemische parameters) van waterstalen uit twee bronnen in Zammelen (voor de ligging der bronnen zie Figuur 1)

plaats	datum	temperatuur °C	pH	conductiviteit (µS/cm)	Ca ²⁺ -gehalte (mg/l)
ZAMMELEN bron 1 : voor de kalktufafzetting (in de bron zelf)					
	2/12/97	4.5	7.62	1380	260
ZAMMELEN bron 1 : op de plaats van afzetting (ca. 5 meter van de bron)					
	2/12/97	5	7.69	1270	264
ZAMMELEN bron 2 : bron zonder kalktufafzetting					
	2/12/97	7.9	7.01	669	144

Figuur 5 : Macroscopische opname van de bovenkant van een (droog) staal van de kalktuf van Zammelen. Gedeeltelijk of volledig met calcië geïncrusteerde mossen, takjes en slakkenhuisjes. De grootte van het gefotografeerde staal is ongeveer 8 cm.



Figuur 6 : Macroscopische opname van de onderkant van een (droog) staal van de recente kalktuf : karakteristiek knobbelige of bloemkoolachtige structuren die een z.g. gemammellonneerd oppervlak vormen. De grootte der individuele knolletjes is ca. 1 à 2 mm.



Figuur 7 : Microscopische opname in doorvallend licht (slijpplaatje) : dwarsdoorsnede van bloemkoolachtige structuren op de onderkant van de recente kalktuf. Afwisseling van radiaalstralige heldere sprietbanden en bruine micrietbanden (carbonaatprecipiterende blauwgroenalgen of stromatolieten). De diameter van één knolletje is ongeveer 1 mm.



rijke informatie over de mogelijkheid tot carbonaatprecipitatie van de bronwaters. De temperatuur is een belangrijke parameter die een invloed uitoefent op de oplosbaarheid van CO₂ in het water. Bij hogere temperaturen is CO₂ minder oplosbaar en zal ontsnappen naar de atmosfeer en een hogere oververzadiging van het bronwater met zich mee brengen. De pH is de bepalende factor of precipitatie van CaCO₃ al dan niet zal optreden. Bij een pH-waarde boven 7 zal carbonaat neerslaan, terwijl bij een pH-waarde kleiner dan 7, het carbonaat zal oplossen. Een pH van 7 geeft aan dat het water net verzadigd is aan carbonaat en er noch precipitatie noch oplossing zal optreden. De conductiviteit of geleidbaarheid (uitgedrukt in microSiemens per cm) is een maatstaf voor de ionenactiviteit of de hoeveelheid aan opgeloste ionen in het water en is dus een maat voor de concentratie aan o.a. Ca²⁺ en Mg²⁺. Een verhoogde conductiviteit betekent dus een hogere concentratie aan opgeloste stoffen. Het Ca²⁺-gehalte in het water is een belangrijke indicatie voor de oververzadiging van het water aan calciumcarbonaat en de precipitatie hiervan. Neerslag zal alleen kunnen gebeuren bij een voldoende hoge concentratie aan calcium.

De kalktufafzetting begint slechts op enige afstand van de bron, ondanks de oververzadiging aan carbonaat van het bronwater zelf. Dit fenomeen is kenmerkend voor alle gekende bronafzettingen. Uit de voorliggende gegevens blijkt dat het bronwater inderdaad oververzadigd is en dat het gekarakteriseerd wordt door een hoge Ca²⁺-concentratie, een hoge pH-waarde en een hoge conductiviteit. Op de plaats waar het carbonaat begint neer te slaan, treden kleine veranderingen op in pH, Ca²⁺-concentratie en conductiviteit, die overeenkomen met de precipitatie van CaCO₃ waarbij Ca²⁺ uit het water wordt opgenomen.

In bron 1 doet zich een duidelijke kalktufvorming voor met precipitatie van calciumcarbonaat op de aanwezige plantenresten en levende organismen. Bron 2 vertoont echter geen enkele carbonaatneerslag. Ook in de waterparameters is dit verschil duidelijk zichtbaar. Bron 2 heeft een duidelijk lagere pH, conductiviteit en Ca²⁺-concentratie dan bron 1. De neutrale pH van 7 toont aan dat het water niet tot zeer weinig oververzadigd is aan carbonaat. Ook de lagere calciumconcentratie en de lagere conductiviteit wijzen erop dat er niet voldoende ionen (vooral Ca²⁺-ionen)

in het water aanwezig zijn om een carbonaatneerslag te veroorzaken.

Macroscopische en microscopische karakteristieken van kalktuf

De actieve kalktuf in Zammelen vormt korsten tot 4-5 cm dikte door precipitatie van calciëet (CaCO_3) op organische substraten, voornamelijk plantenmateriaal en invertebraten, zoals: mossen, zaden, bladeren, takjes, mollusken (waaronder zoetwaterschelpjes en -slakjes), enz. De bovenzijde van deze korsten (Figuur 5) bestaat macroscopisch uit een continue lichtbruine tot beige "gladde" carbonaatafzetting rond en over planten en invertebraten. De afzetting is zeer poreus (met vele holten) en de vorm van het geheel wordt volledig bepaald door de groei en/of de morfologie van de erin aanwezige planten (hoofdzakelijk bladeren, takjes, mossen). De korst zelf bestaat ofwel uit een continue beige afzetting van grotere en kleinere calciëtkorrels op plantendelen en takjes, ofwel uit een meer knolvormige afzetting rond takjes. Verder komen er ook modderige niet-carbonaathoudende afzettingen voor (kwelmoerasselijk rijk aan organisch materiaal). Horizontale netwerken of matten van geïncrusteerde filamenten (slierten) van algen komen voor over gans de gladde afzetting evenals op de mossen. De algair slierten worden omgeven door een korrelig carbonaatomhulsel, zodat kleine spaghetti-achtige buisjes ontstaan. Mossen maken een belangrijk onderdeel uit van deze afzetting; zij groeien naar boven uit de afzetting, waar ze progressief met CaCO_3 worden bedekt en vervolgens in de poreuze kalktufmassa mee opgenomen worden ("versteend"). Gedeeltelijk of volledig met carbonaat omgeven huisjes van terrestrische en zoetwater mollusken (o.a. *Pupilla*, *Lymnea*, *Pisidium*) werden eveneens op en in de korsten herkend.

De onderzijde van de korsten bestaat uit een onregelmatige, poreuze donkerder gekleurde carbonaatafzetting, die eveneens gevormd wordt door incrustatie van planten. Vele holten zijn aanwezig evenals afdrukken van takjes, gastropoden (slakjes), zaden en soms mossen. De korst bestaat hier uit een relatief gladde massieve donkerbruine afzetting van calciëtkorrels, niet-carbonaathoudend slijk en een opvallende donkerbruine knolvormige of z.g. gemammelonnerde calciëtafzetting (Figuur 6). Deze laatste is continu of vormt

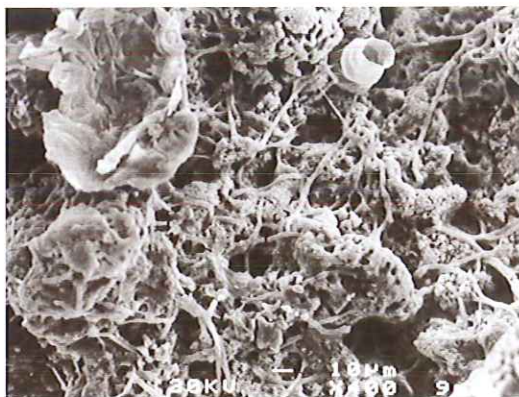
zich rond takjes. Deze knolletjes gelijken het meest op kleine bloemkoolachtige structuren.

Voor de studie van de interne opbouw van de kalkkorst werd gebruik gemaakt van gespecialiseerde technieken zoals petrografisch onderzoek (waarbij ultradunne verticale doorsneden - slijpplaatjes genoemd - onder een optisch microscoop, in gepolariseerd licht worden bekeken) en rasterelektronenmicroscopie van het oppervlak van de kalktuf.

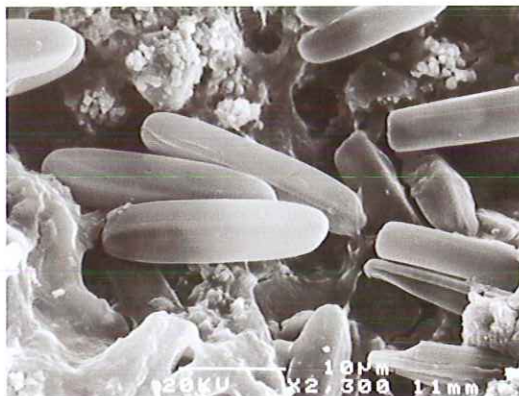
Onder de optische microscoop wordt de interne poreuze structuur van de korst nog duidelijker. De holten zijn in feite het resultaat van de morfologie van de planten zelf (ruimte tussen de individuele plantendelen) of ze zijn te wijten aan het afsterven van de verschillende plantendelen (men herkent duidelijk "spookbeelden" van verdwenen takjes en mossen, zoals ronde dwars- en vertakte lengtedoorsneden). Naast planten werden ook invertebraten herkend, zoals doorsneden van kalkschalen van mollusken, waaronder hoofdzakelijk kleine gastropoden. De carbonaatafzetting bestaat mineralogisch uit fijnkorrelig meestal bruinachtig (micriet) en grofkorrelig helder calciëet (spriet). De niet-carbonatische insluitels bestaan hoofdzakelijk uit organisch materiaal (organisch-rijke modder) en detritisch materiaal (zeer fijn zand); in dit laatste herkennen we vooral kwartsnaast zeldzame glauconietkorrels, die waarschijnlijk afkomstig zijn uit de nabijgelegen zandlagen (Formatie van Sint-Huibrechts-Hern).

Zeer karakteristiek voor de knobbelige afzetting zijn de bundels waaivormige of radiaalstralige sprietkristallen (Figuur 7) en de donkere (groei?) ringen of laminaties van micrietkristallen in de bloemkoolachtige structuren (knolletjes van circa 1 à 2 mm diameter). Dit zijn individuele kolonies, met radiaal uitwaaiende filamenten, van carbonaat omgeven blauw-groenwieren (cyanobacteriën), die bijdragen tot de opbouw van de kalktuf. Analoge knolvormige (kegelvormige) en fijngelamineerde horizontale biogene structuren zijn gekend uit recente en fossiele mariene en niet-mariene fossiele carbonaatafzettingen, waar ze "stromatolieten" worden genoemd. Deze laatste vormen centimeter- tot meterhoge formaties als gevolg van het vangen en neerslaan van kalkpartikels in gelamineerde algair matten. Deze primitieve organismen zijn ook de eerste levensvormen op aarde geweest (belangrijkste levensvorm tijdens het Precambrium)

Figuur 8 :
Rasterelektronenmicroscopische opname (foto 258/3) : netwerk van algenfilamenten op het buitenoppervlak (bovenzijde) van de recente kalktuf. Het horizontale witte balkje (onder) geeft de schaal aan (= 10 micrometer).



Figuur 9 :
Rasterelektronenmicroscopische opname (foto 258/8) : detail van enkele diatomeeën (behorende tot de genera *Pinnularia* en *Nitzschia*) op en tussen de algaire filamenten aan het buitenoppervlak (bovenkant) van de recente kalktuf. Het horizontale witte balkje geeft de schaal aan (= 10 micrometer).



en ze komen nu nog steeds voor, waarbij ze de meest extreme milieus kunnen koloniseren.

Naast gedetailleerde analyses van de mineralogische en morfologische kenmerken van de kalkkorst, heeft rasterelektronenmicroscopisch onderzoek ook geleid tot het herkennen van diverse microscopische organismen in en op de carbonaatkorst. Zo zijn naast verschillende morfologische kristalvariëteiten van calciet (o.a. anhedrale of onregelmatige, blokkige en driehoekige kristallen), ook dunne draadvormige algenfilamenten (Figuur 8) en verschillende diatomeeënsoorten te herkennen (Figuur 9), waaronder species behorende tot de genera: *Cocconeis*, *Navicula*, *Achnanthes*, *Synedra*, *Amphora*, *Rhoicosphenia*, *Diploneis*, *Pinnularia* en *Nitzschia*. Alhoewel de vermelde soorten kosmopolitisch zijn, t.t.z. in alle zoetwaterbiotopen kunnen voorkomen, zijn er toch enkele karakteristieke diatomeeën voor dit kalkrijke bronwater (Pascher & Hustedt, 1930): zo blijken *Diploneis* en *Nitzschia* een voorkeur te hebben voor bronwater, terwijl *Navicula* het best in oligotrofe (voedselarme) Ca-rijke waters gedijt.

Tabel 2 geeft een overzicht van alle waargenomen macroscopische en microscopische karakteristieken

Tabel 2 : Samenvatting van de macroscopische en microscopische waarnemingen uitgevoerd op stalen van de recente kalktuf van Zammelen

Structuur	macroscopisch	microscopisch (binoculair)	microscopisch (slijpplaatjes)	rasterelektronen microscopisch
Oppervlak bovenkant: gladde beige afzetting	Alle organische structuren worden bedekt door een continue gladde beige carbonaatafzetting	De gladde carbonaat-afzetting bestaat uit een dunne laag van grotere en kleinere carbonaatskorrels.	Dwarsdoorsnede : planten, mossen en invertebraten worden geïncrusteerd door een afzetting van "blokkige" sparietkristallen en bruine micrietafzetting; talrijke kwartskorrels	De gladde carbonaatlaag bestaat uit een dichte afzetting van kleinere anhedrale en grotere "blokkige" kristallen, organische structuren en dunne algaire filamenten.
Mossen	Groene mosplantjes groeien uit de afzetting en worden progressief geïncrusteerd door een carbonaatafzetting	Incrustatie-evolutie : van enkele carbonaatskorrels naar een continue laagje van kristallen rond de blaadjes tot afzetting rond het plantje en over meerdere plantjes	Doorsnede door organisch materiaal geeft dunne spleetvormige en ronde openingen in een afzetting van spariet en micriet.	Incrustatie-evolutie : van geribbelde blaadjes met verspreide kristalgroepjes en diatomeeën naar een continue laag van kristallen en diatomeeën.
Algenfilamenten	Poreuze horizontale matten van geïncrusteerde groene algenfilamenten over de afzetting en mossen	Incrustatie van de individuele filamenten door een dun laagje van carbonaatskorrels rond de filamenten	Dunne buisvormige structuren in een afzetting van micriet en spariet.	Buisjes (70-80 µm), gevormd uit filamenten met een afzetting van driehoekige en anhedrale kristallen, organische structuren en diatomeeën
Onderkant: gemammeloniseerd oppervlak	Onregelmatige poreuze donkerder gekleurde afzetting van incrustaties rond planten en donkerbruine knobbelige afzettingen in een continue laag of rond takjes	De knobbelige afzetting bestaat uit ronde tot onregelmatige bollen in een continue laag of rond takjes	Dwarsdoorsnede: talrijke bundels van waaiervormige en radiaalstralige spariet-micriet-delen met interne algaire structuren	Ronde poreuze bollen met driehoekige kristallen, algenfilamenten en holten; gladde bollen en onregelmatige poreuze afzetting

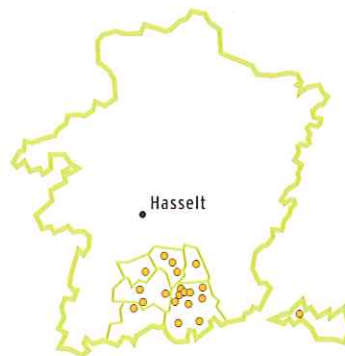
van de actieve meteogene of koudwater bronafzetting van Zammelen.

Kalktuf als bouwsteen in Haspengouw

Het is opmerkelijk dat in verschillende monumenten in en rond Tongeren (Figuur 10), gezaagde of gehouwen kalktuf werd gebruikt als bouw materiaal. Kalktuf wordt in Tongeren inderdaad regelmatig in Romeinse gebouwen uit de 2e eeuw aangetroffen (Romeinse stadsomwalling, muren van Romeinse woningen). Bovendien werd deze fossiele kalktuf vaak "gerecycleerd" en samen met andere variëteiten van natuursteen zoals zandsteen, silex, "mergelsteen", enz., gebruikt bij de bouw of de historische restauratie van jongere constructies: bijvoorbeeld de 13e eeuwse middeleeuwse stadsomwalling van Tongeren (Figuur 11) of de torens van oude kerken (Figuur 12) in verschillende Haspengouwse gemeenten (dorpen van de fusiegemeenten Heers, Borgloon, Wellen, Kortesseem, Hoeselt en Tongeren).

De macroscopische en microscopische karakteristieken van dit gerecycleerde materiaal vertonen veel gelijkenissen met die van de actieve kalktuf in Zammelen (Tabel 3). Algemeen kan gesteld worden dat de fossiele kalktufafzetting uit de monumenten veel compacter en hierdoor ook harder is dan de recente bronafzetting; dit is uiteraard het resultaat van latere rekristallisaties (diagenese) van het carbonaat als gevolg van de grotere relatieve ouderdom van de fossiele kalktuf. Sporen van organismen zijn ook niet zo frequent als in de recente afzetting, alhoewel regelmatig "spookbeelden" of karakteristieke holten van verdwenen mosplantjes (Figuur 13) evenals doorsneden van algair filamenten (Figuur 14) en van invertebraten (gastropoden, ostracoden) worden aangetroffen. Qua originele textuur (samenstelling) en fauna- of flora-inhoud zijn de actieve en fossiele kalktuf dus sterk verwant.

De herkomst van de fossiele kalktuf is niet duidelijk. De concentratie van de tufbouwsteen in de oude gebouwen rond Tongeren wijst in de richting van een lokaal voorkomen ergens in de regio van Zuid-Haspengouw. Eigenaardig genoeg vinden we hiervan dan in de natuur geen enkel spoor meer terug. Anderzijds bestaan er historische en geologische aanwijzingen



Figuur 10 : Geografische spreiding van het gebruik van fossiele kalktuf als bouw materiaal in oude monumenten (o.a. Romaanse kerktorens) in Zuid-Limburg : opvallend is de concentratie in en rond Tongeren.

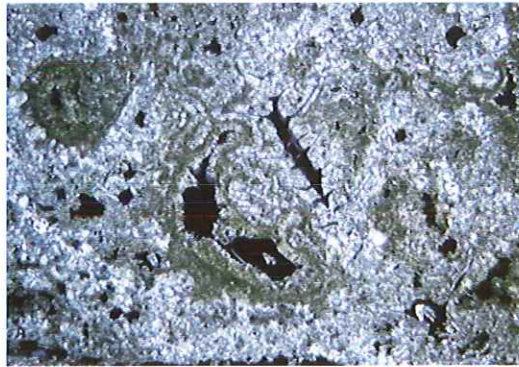


Figuur 11 : Mozaïek van zandsteen (bruin), silex (grijs), kalktuf (beige), rode baksteen (Romeinse dakpannen) en strogeel Maastrichts korrelkrijt ("mergel") in de recent gerestaureerde Velintoren uit de Middeleeuwse stadsomwalling (13e eeuw) van Tongeren.

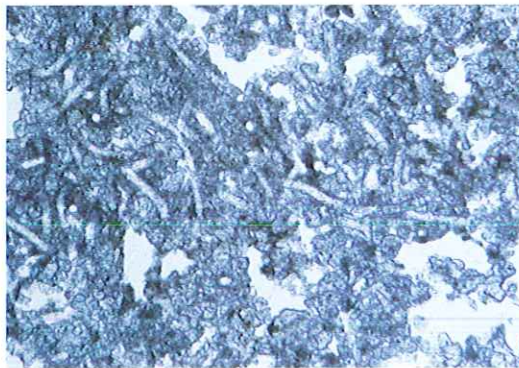


Figuur 12 : Detail van een blokje kalktuf (gerecycleerd Romeins materiaal) in de buitenmuur van de Romaanse Sint Martinuskerk (11e eeuw) van Berg (Tongeren). Grootte ongeveer 15 cm.

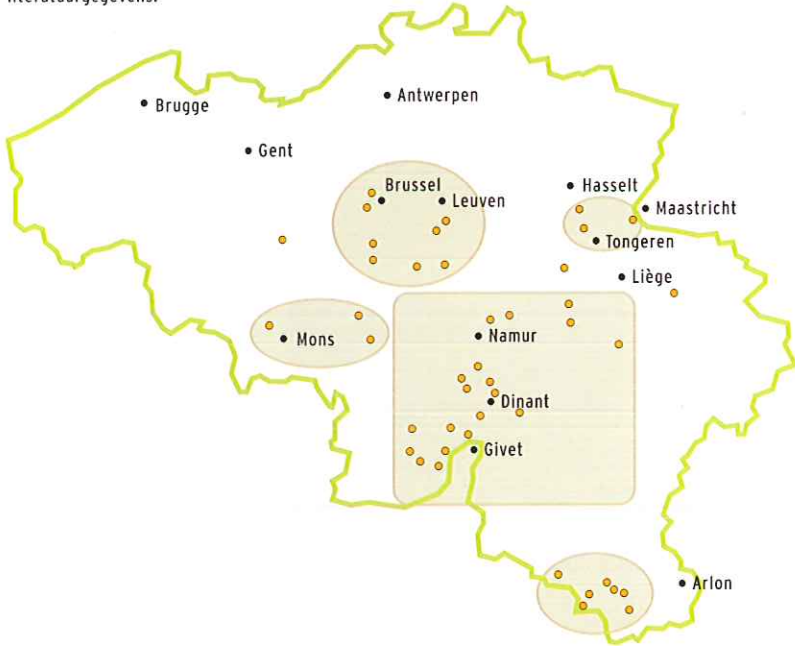
Figuur 13 : Microscopische opname (slijpplaatje - gepolariseerd doorvallend licht) van een monster van fossiele kalktuf (2e eeuwse Romeinse muur Tongeren). Men herkent duidelijk de vele holten (zwart) waaronder "spookbeelden" van afgestorven mossen (midden) evenals de karakteristieke heldere spriet- en donkere (bruinachtige) micrietkristallen. Lengte van het mosdeeltje 1,5 mm.



Figuur 14 : Microscopische opname (slijpplaatje - doorvallend licht) van een monster van de "Romeinse" kalktuf. Karakteristieke buisvormige dwars- en lengtedoorsneden van algale filamenten. Diameter van de buisjes 50 - 80 micrometer.



Figuur 15 : Geografische spreiding van het voorkomen van fossiele en recente kalktufafzettingen in België, gebaseerd op literatuurgegevens.



voor de invoer van "uitheemse" natuursteen (o.a. blauwe hardsteen en vulkanische tufsteen) vanuit Zuid-België (Condroz) en de Euregio (Eifel).

De Haspengouwse ondergrond bevat inderdaad talrijke carbonaatvoerende geologische formaties (oud-Tertiair en jong-Mesozoïcum) en kalkrijke watervoerende lagen, waaruit lokaal precipitatie mogelijk is of is geweest. De precipitatiesnelheid van kalktuf is bovendien groot (1 tot 4 mm per jaar; Geurts, 1976) zodat er in de loop der tijden gemakkelijk dikkere afzettingen (met dikten tot enkele tientallen centimeters) konden gevormd worden. Door hun beperkte uitgestrektheid zijn de volumes echter eerder klein.

Een ander voorbeeld van zulk een kleinschalige actieve kalktufafzetting zijn de kalktufkegels of "erons" in de omgeving van Borgloon. Door de aanleg van een omleiding ten Zuiden van het centrum van Borgloon (de Zuidelijke tak van de N79) zijn diepe kunstmatige insnijdingen ontstaan in de kalkhoudende (zeer fossielrijke) Zanden en Mergels van Oude Biezen (Onder-Oligoceen; Formatie van Borgloon). De steile Zuidwand van deze ingesneden weg is verstevigd met kas-eisen, maar door de druk van het grondwater erachter, zijn kleine bressen in de muur ontstaan waardoor kalkhoudend water tussen de stenen naar buiten sijpelt. Dit water heeft onderaan de steile helling kleine met mos begroeide kegels ("erons") van kalktuf gevormd. De doorsnede van individuele kegels bedraagt maximaal 50 cm en de dikte kan tot 10 cm oplopen. De ouderdom van deze afzetting zou hoogstens 20 - 25 jaar bedragen. De interne structuur is sponsachtig met karakteristieke incrustaties van mossen.

Het is dus niet uit te sluiten dat er vroeger verschillende gelijkaardige afzettingen in het toenmalige Haspengouwse landschap voorkwamen (kalktufafzettingen in de vele beekdalen of in natuurlijke insnijdingen). Omwille van het sterk lokale karakter en de beperkte volumes van deze afzettingen zouden ze nu volledig, door exploitatie als bouw materiaal, zijn verdwenen. De Romeinen hebben dit natuurlijke materiaal inderdaad hier als eersten ontdekt en ook daadwerkelijk gebruikt: travertijn en kalktuf was bij hen immers zeer geliefd, vooral omwille van de bewerkingsmogelijkheden (zacht) en de technische eigenschappen ervan (relatief sterk en isolerend materiaal). Het ligt dus voor de hand dat voor de herkomst van de

in de gebouwen aangetroffen kalktuf eerder een lokale (ondertussen verdwenen) bron moet gezocht worden, alhoewel import van fossiele kalktuf uit meer zuidelijk gelegen gebieden en transport via de Maas niet uit te sluiten zijn (Prof. F. Gullentops, persoonlijke mededeling). Immers, verschillende belangrijke en relatief omvangrijke fossiele en actieve kalktufafzettingen zijn gekend uit rivieren en bronnen van de kalksteenrijke Condrosstreek (Figuur 15). Historici hebben trouwens aanwijzingen gevonden voor historische uitbatingen en het gebruik van kalktuf in Middeleeuwse gebouwen (o.a. in kerkgewelven) in dit gebied.

zijn nu als z.g. paleoprofielen (fossiele doorsneden) in de rivieroevers te herkennen. Deze profielen zijn ontstaan door insnijding van het water in de vroeger gevormde kalktuf. Dergelijke fossiele afzettingen hebben allen een Holocene ouderdom (jongste periode uit het Quartair tijdperk: van 10.000 jaar geleden tot nu). Ze zijn allen ontstaan na de ijstijden, meer bepaald tijdens de warmste periodes van het Holoceen (het Boreaal en het Atlanticum) toen de belangrijkste carbonaatprecipitaties hier in België werden gevormd (Gullentops en Mullenders, 1972). De nu nog steeds actieve kalktuf-afzettingen vormen zich in bronnen, rivieren en op hellingen (Geurts, 1975, 1976).

Regionale verspreiding van kalktuf

De in België voorkomende fossiele kalktufafzettingen hebben hun precipitatie-activiteit volledig gestaakt en

De Belgische afzettingen kunnen in 5 grote regionale groepen opgedeeld worden (zie Figuur 15). De eerste groep situeert zich rond Brussel en Leuven, met de kalkrijke Brusseliaanzanden als voornaamste kalkbron

Tabel 3 : Vergelijking tussen de macroscopische en microscopische karakteristieken van de recente kalktuf en van de fossiele kalktuf ("Romeinse" kalktuf of tufbouwsteen)

structuur	recente bronafzetting	fossiele kalktuf (bouwsteen)
Algemene opbouw	- poreuze kalktuf gevormd door incrustatie van plantenmateriaal - poreus, licht, zacht, brokkelig (broos) - vele levende organismen in en op de carbonaatafzetting - poreuze kalktuf gevormd door incrustatie van plantenmateriaal	- poreuze kalktuf gevormd door incrustatie van plantenmateriaal - compacter, minder poreus, zwaarder en harder - geen oorspronkelijk organisch materiaal meer aanwezig, alleen afdrukken en vormen
Morfologie van de korst	- bovenkant: gladde continue afzetting over de organische structuren - onderkant: knobbelige afzetting (bloemkoolachtig)	- onregelmatige massieve afzetting rond en tussen het organisch materiaal - geen knobbelige afzetting
Organische componenten		
Planten	- stukjes hout en bladeren van hogere planten - incrustatie door micriet- en sparietkristallen	- afdrukken van hout, ronde en spleetvormige holten - incrustatie door grote sparietkristallen
Mossen	- vele groene mosplantjes op en in de afzetting - incrustatie door micriet en spariet rond de mosdelen, geen afzetting ertussen	- geen oorspronkelijke mossen meer, wel afdrukken en ronde en spleetvormige holten - incrustatie door grote sparietkristallen rond en tussen de mosdelen
Diatomeeën	- talrijk en soortrijk	- niet aanwezig
Algen	- brede filamenten over de afzetting en mossen, incrustatie door anhedrale kristallen rond de filamenten - dunne filamenten in de afzetting aan de boven- en de onderkant - dunne radiaalstralige filamenten in de knobbelige afzetting	- brede buisvormige structuren en ronde openingen in de massieve sparietafzetting
Invertebraten	- gastropoden - micriet en sparietafzetting er rond	- gastropoden en ostracoden - opgenomen in de massieve sparietmassa, opvulling van inwendige holten (schelpen)
Incrustatie / carbonaat	- bruine micrietafzetting - "blokkige" sparietkristallen op en rond de organische structuren - vele kwartskorrels (fijn zand)	- vooral een massieve afzetting van grote "blokkige" sparietkristallen met holten en micriet - opvulling van holten met poreus micriet of met grote sparietkristallen t.g.v. cementatie - geen zandkorrels aanwezig

(o.a.: Symoens, 1949; Camerman, 1950; Mullenders *et al.*, 1966). De tweede groep situeert zich rond Dinant - Namen - Givet (Condroz), waar de Boven-Devoonen Onder-Carboonkalkstenen de carbonaatbron zijn (o.a.: Gullentops & Mullenders, 1972; Geurts, 1976; Duviéneaud & Saintenoy-Simon, 1992; Janssen & Swennen, 1998). In Lotharingen, waar het carbonaat afkomstig is van de Jurakalkstenen, komt de derde groep van afzettingen voor (o.a.: Van Oye & Hubert, 1937; Symoens *et al.*, 1951; Paepé *et al.*, 1970). De vierde groep beperkt zich tot enkele afzettingen gekend uit de streek rond Mons (Paleozoïsche kalksteen- en Mesozoïsche krijtlagen). Een vijfde groep wordt tenslotte gevormd door de drie tot nu toe gekende afzettingen in Zuid-Limburg; de twee actieve afzettingen in Haspengouw (Zammelen en Borgloon : deze studie) en de fossiele afzetting in de Jekervallei te Kanne (Paulissen *et al.*, 1981). Voor deze afzettingen zijn de kalkrijke formaties uit het Oud-Tertiair en het Jong-Mesozoïcum de respectievelijke kalkbronnen.

De afzettingen van kalktuf die zich nu actief in rivieren en bronnen vormen, vertonen enkele verschillende macrotypes (Janssen *et al.*, 1998). Het eerste type wordt gekenmerkt door horizontaal gelamineerde korsten, die op de rivierbodem worden afgezet. Deze korsten ontstaan door neerslag van CaCO_3 in algair maten die een seizoenale laminatie vertonen (Geurts, 1976). Per definitie gaat het hier dus om travertijn. Het tweede type bestaat uit een poreuze kalktuf, gevormd door incrustaties (omkorstingen) van planten, mossen, algen, enz. Het derde type wordt opgebouwd door dunne algair korsten op anorganische substraten. Beide laatste types zijn het meest voorkomend in België. De paleoprofielen worden meestal opgebouwd uit een losse korrelige kalktuf (o.a. te Kanne) met hierin voorkomend gelamineerde algair korsten of een poreuze kalktuf rond planten, die sterk vergelijkbaar zijn met de macrotypes van de recente afzettingen.

De actieve bronnenkalk van Zammelen, de kleine "crons" van Borgloon en de fossiele kalktuf uit de monumenten van Haspengouw, behoren dus allen tot het tweede macrotype, n.l. tot de poreuze sponsachtige kalktuf ontstaan door incrustaties van en door organismen (precipitaten op organische substraten)

Samenvatting

Kalktuf is een biologisch geïnduceerde en fysisch-chemisch gecontroleerde neerslag van kalk (calciumcarbonaat) op allerlei organische en niet-organische substraten in rivier- of bronwater. In Zammelen wordt aan de voet van een steile dalflank van de Mombeekvallei, een poreuze korst van bronnenkalk (bronnkalktuf) gevormd door precipitatie van calciumcarbonaat uit kalkhoudend kwelwater. Organismen zoals blauwgroenalgen en mossen nemen actief deel aan dit actuele geologische proces. Andere organische resten (zoals slakkenhuisjes, zaadjes, takjes, bladeren) spelen een eerder passieve rol: ze worden door incrustatie in de kalkkorst mee opgenomen en worden zo als het ware "versteend". De bronnenkalk van Zammelen behoort tot één der zeldzame nu nog actieve kalktufvormingen in Vlaanderen. In dezelfde Zuid-Limburgse regio (o.a. bij Borgloon) vormen er zich lokaal ook kleinere poreuze kalktufkegels of "crons". Het hoge kalkgehalte van de actief precipiterende bronwaters wordt veroorzaakt door langdurige circulatie van het grondwater in sterk kalkhoudende geologische formaties: n.l. de kalk- of fossielhoudende Tertiaire mergels en zanden (Lid van Gelinden; Lid van Oude Biezen) enerzijds en het Mesozoïsch korrelkrijt (Formatie van Maastricht) anderzijds. Het frequente voorkomen van (fossiele) kalktuf als bouwsteen in verschillende Romeinse en Middeleeuwse gebouwen van Zuid-Haspengouw, getuigt van het mogelijke bestaan van veel oudere, maar inmiddels volledig verdwenen lokale en kleinschalige kalktufafzettingen in dezelfde regio.

Dankwoord

De auteurs danken de volgende personen voor hun hulp bij het tot stand komen van dit artikel: Geert Kempeneers (Conservator Zammelen) voor het gidsen in het natuurreservaat, Michiel Duser en Eric Groessens (Belgische Geologische Dienst) voor aanvullende bibliografische en geologische informatie, Marcel Verbeek en Paul Denis voor het aanwijzen van het bestaan van de kleine "crons" in Borgloon, Prof. Rudy Swennen (K.U.Leuven) voor het gebruik van de rasterelektronenmicroscop, de directie van de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO, Mol), voor het gebruik van de optische microscopen, en Prof. Em. Frans Gullentops (K.U.Leuven) voor de historische

aanwijzingen i.v.m. de mogelijke herkomst van de kalktuf in de monumenten van Zuidelijk Haspengouw.

Referenties

BATES, R.L. & J.A. JACKSON, 1987. Glossary of Geology. American Geological Institute, 3d Edition : 698-705.

BOOGAERTS, S., 1997. Wandelen in Zammelen en de Mombeekvallei. Natuurreservaten 19(4) : 4-7.

CAMERMAN, M.C., 1950. Compte-rendu de l'excursion du dimanche 30 avril 1950 dans la vallée du Train (Brabant oriental). Bulletin de la Société belge de Géologie, 59 : 136-153.

CHAFETZ, H. & R.L.FOLK, 1984. Travertines: depositional morphology and bacterially constructed constituents. Journal of Sedimentary Petrology, 54 : 289-316.

DESMEDT, P., L. DRIESSEN & J. VAN BAELEN, 1981. Hydrogeologische aspecten van de secundaire en tertiaire formaties in Zuid-Limburg. Hydrographica, 2-1981.

DUVIGNEAUD, J. & J. SAINTENOY-SIMON, 1992. Deux tufs calcaires sur Famennien à Hastière et à Blaimont (province de Namur). Les Naturalistes belges 73(4) : 199-204.

FORD, T.D. & H.M. PEDLEY, 1996. A review of tufa and travertine deposits of the world. Earth-Science Reviews 41 : 117-175.

GEURTS, M.-A., 1975. Formation de travertins postglaciaires en Belgique. Colloque "Types de croûtes calcaires et leur répartition régionale". Université Louis Pasteur, U.E.R. de Géographie, Strasbourg, 9-11 janvier 1975 : 76-79.

GEURTS, M.-A., 1976. Genèse et stratigraphie des travertins de fond de vallée en Belgique. Acta Geographica Lovaniensia 16, 104 p.

GULLENTOPS, F. & W. MULLENDERS, 1972. Age et formation de dépôts de tuf calcaire holocène en Belgique. Les Congrès et Colloques de l' Université de Liège 67 : 113-135.

JANSSEN, A., R. SWENNEN, N. PODOOR & E. KEPPENS, (1998, in druk). Biological and diagenetic influence within recent and fossil tufa deposits from Belgium. Sedimentary Geology spec. publ.

JANSSEN, A. & R. SWENNEN, (1998, in druk). Petrography and geochemistry of the travertine deposit at Treignes (S.Belgium). Bulletin de la Société Géologique de Belgique, n° 106.

MULLENDERS, W., F. GULLENTOPS, J. LORENT, M. COREMANS & E. GILOT, 1966. Le remblaiement de la vallée de la Nethen. Acta Geographica Lovaniensia 4 : 169-181.

PAEPE, R., R. SOUCHEZ, G. PEETERS & M. KUGLER, (1970). Le barrage de travertin de la vallée du Williers (sondages de Villers-devant-Orval). Professional Paper, aardkundige Dienst van België, n°1, 39 p.

PASCHER, A. & F. HUSTEDT, 1930. Die Süßwasser-flora Mitteleuropas. Heft 10: Bacillariophyta (Diatomeae). Jena, Verlag von Gustav Fischer.

PAULISSEN, E., F. GULLENTOPS, P. VERMEERSCH, M.-A. GEURTS, E. GILOT, W. VAN NEER, E. VAN VOOREN, & E. WAGEMANS, 1981. Evolution holocène d'un flanc de vallée sur substrat perméable (Hesbaye sèche, Belgique). Mémoire de l'Institut géologique de l'Université Catholique de Louvain, XXXI, 23-75.

PENTECOST A. & H. VILES, 1994. A review and reassessment of travertine classification. Geographie physique et Quaternaire 48(3) : 305-314.

SYMOENS, J.J., 1949. Note sur des formations de tuf calcaire observées dans le bois d'Hautmont (Wauthier-Braine). Bulletin de la Société Royale de Botanique de Belgique 82 : 81-95.

SYMOENS, J.J., P. DUVIGNEAUD & C. VAN DEN BERGHEN, 1951. Aperçu sur la végétation des tufs calcaires de la Belgique. Bulletin de la Société royale de Botanique de Belgique 83 : 329-352.

VAN OYE, P. & B. HUBERT, 1937. Recherches sur les "crons" du Jurassique belge. Biologisch Jaarboek 4 : 230-279.