museum

KONINKLIJK BELGISCH INSTITUUT
VOOR NATUURWETENSCHAPPEN

INSTITUT ROYAL DES SCIENCES
NATURELLES DE BELGIQUE

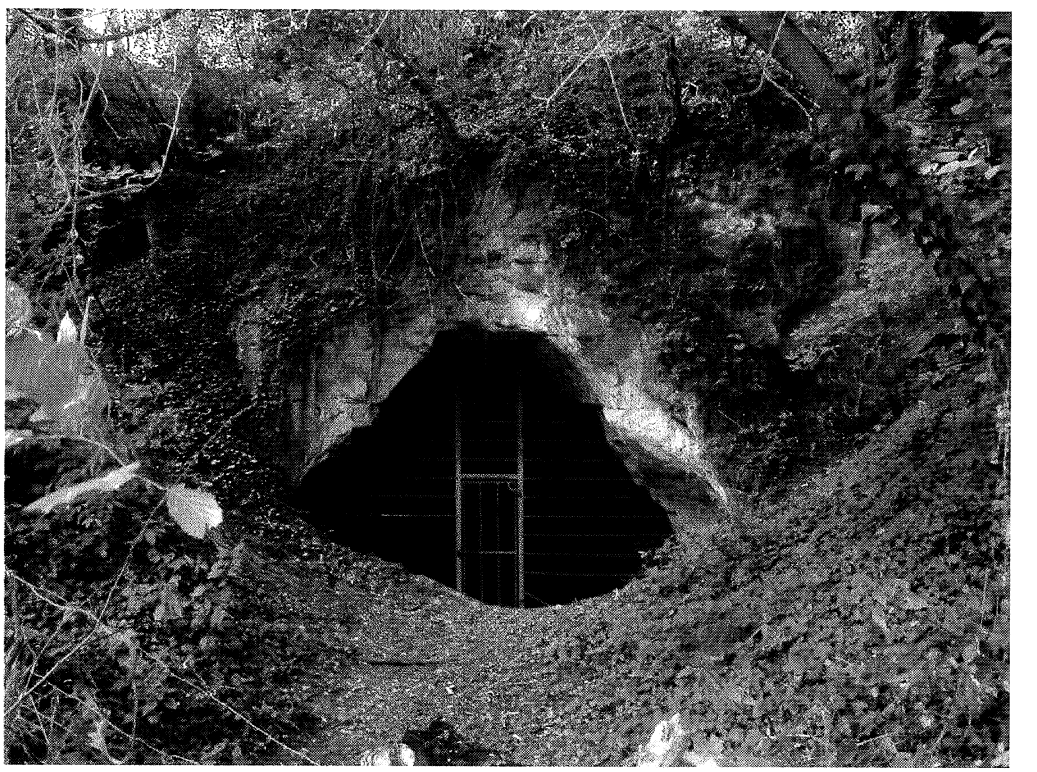
ROYAL BELGIAN INSTITUTE OF NATURAL SCIENCES

GEOLOGICAL SURVEY OF BELGIUM
PROFESSIONAL PAPER 2005/1 – N. 301

SERVICE GEOLOGIQUE DE BELGIQUE
BELGISCHE GEOLOGISCHE DIENST

DE MERGELGROTTEN VAN HINNISDAEL TE VECHMAAL (GEMEENTE HEERS, LIMBURGS HASPENGOUW), EEN GEOLOGISCHE BIJDRAGE TOT DE STUDIE VAN HET KRIJT

Michiel DUSAR, David LAGROU,
Luc WILLEMS, P.J. (Sjeuf) FELDER & Johan MATTHIJS



Geological Survey
of Belgium

Rue Jenner 13 - 1000 Bruxelles
Jennerstraat 13 - 1000 Brussel

ISSN 0378-0902

KONINKLIJK BELGISCH INSTITUUT
VOOR NATUURWETENSCHAPPEN

INSTITUT ROYAL DES SCIENCES
NATURELLES DE BELGIQUE

ROYAL BELGIAN INSTITUTE OF NATURAL SCIENCES

GEOLOGICAL SURVEY OF BELGIUM
PROFESSIONAL PAPER 2005/1 - N. 301

De mergelgrotten van Hinnisdael te Vechmaal (gemeente Heers, Limburgs Haspengouw), een geologische bijdrage tot de studie van het Krijt

Michiel DUSAR[1], David LAGROU[2],
Luc WILLEMS[3], P.J. (Sjeuf) FELDER[4] & Johan MATTHIJS[2]

1. *Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen, Belgische Geologische Dienst, Jennerstraat 13, B-1000 Brussel <michiel.dusar@natuurwetenschappen.be>*
2. *Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO), Grondstoffen, Materiaaltechnologie, Boeretang 200, B-2400 Mol <david.lagrou@vito.be> <johan.matthijs@vito.be>*
3. *Université de Liège, Dépt. Géologie, B20, B-4000 Liège-1 <LucWillems65@versateladsl.be>*
4. *Kapelweg 15, NL 6267 BT Cadier en Keer <sjeuf.felder@wanadoo.nl>*

(89 bladzijden, 104 figuren, 15 tabellen)

Omslagbeeld. Zicht op de huidige ingang van de mergelgrot Hinnisdael 1 (Foto D. Lagrou).

Comité éditorial: L. Dejonghe, P. Laga
Secrétaire de rédaction: M. Dusar
Service Géologique de Belgique
Rue Jenner, 13 - 1000 Bruxelles
Belgique

Redactieraad: L. Dejonghe, P. Laga
Redactiesecretaris: M. Dusar
Belgische Geologische Dienst
Jennerstraat 13, 1000 Brussel
België

INHOUDSTAFEL

Samenvatting 1
Résumé 2
Summary 3
Kurzfassung 4
Dankwoord 6
1. Inleiding 7
2. Plattegronden 9
2.1. Het in kaart brengen van de grotten 9
2.2. Overzicht en benaming van de grottenstelsels 10
2.3. Lokalisatie van de grotingangen 14
2.4. Grotplannen op de reliëfkaart 18
3. Historisch overzicht 20
3.1. Wanneer werden de mergelgrotten gedolven ? 20
3.2. Later gebruik 22
4. Ontstaan van de mergelgrotten 23
4.1. Exploitatietechniek 23
4.2. Productie 27
5. Stratigrafie 29
5.1. Afdekkende lagen 29
5.2. Krijtlagen 31
5.3. Geologische kaart 33
6. Sedimentologie 34
6.1. Sedimentologie van de Kalksteen van Nekum 34
6.2. Vuursteen of tauw 40
6.3. Sedimentologie van de Kalksteen van Meerssen 43
6.4. Bioklasten – ecozonatie 47
6.4.1. Bioklastenonderzoek van monsters uit de mergelgrotten Hinnisdael 1 en Champignonskuil 47
6.4.2. Bioklastenonderzoek van monsters uit Hinnisdael VII (Waterkuil) 51
6.5. Vergelijking met de typelokaliteit 52
6.5.1. Lid van Nekum 52
6.5.2. Lid van Meerssen 54
7. Tektoniek 55
7.1. Helling van de Krijtlagen 55
7.2. Diaklazen en breuken 55
8. Karst 60
9. Grondwater 65
9.1. Grondwaterstanden 65
9.2. Relatie karst – grondwater 67
9.3. Drijvende calciet en microklimaat 68
10. Geologische risico's 69
10.1. Instortingen: hoe gevaarlijk zijn de Mergelkuilen? 69
10.2. Opvulling van de Champignonskuil 73
10.3. Behoud door beheersmaatregelen 78
11. Bouwstenen 79
11.1. Voorkomen en winning 79
11.2. Waar werd de steen van Vechmaal gebruikt? 79
11.3. Wanneer werd de steen van Vechmaal gebruikt? 81
12. Belang en behoud van de mergelgrotten 82
12.1. Bescherming van de Mergelkuilen van Hinnisdael 82
12.2. Geologisch belang 83
13. Besluit 85
14. Referenties 86
Lijst figuren en tabellen

PROFESSIONAL PAPER 2005/1 - N. 301: 1-89

DE MERGELGROTTEN VAN HINNISDAEL TE VECHMAAL (GEMEENTE HEERS, LIMBURGS HASPENGOUW), EEN GEOLOGISCHE BIJDRAGE TOT DE STUDIE VAN HET KRIJT

Michiel DUSAR[1], David LAGROU[2], Luc WILLEMS[3], P.J. (Sjeuf) FELDER[4] & Johan MATTHIJS[2]

1. *Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen, Belgische Geologische Dienst, Jennerstraat 13, B-1000 Brussel <michiel.dusar@natuurwetenschappen.be>*
2. *Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO), Grondstoffen, Materiaaltechnologie, Boeretang 200, B-2400 Mol <david.lagrou@vito.be> <johan.matthijs@vito.be>*
3. *Université de Liège, Dépt. Géologie, B20, B-4000 Liège-1 <LucWillems65@versateladsl.be>*
4. *Kapelweg 15, NL 6267 BT Cadier en Keer <sjeuf.felder@wanadoo.nl>*

(89 bladzijden, 104 figuren, 15 tabellen)

SAMENVATTING. De Mergelgrotten (lokaal 'mergelkuilen') van Hinnisdael liggen ten westen van Tongeren in het kerkdorp Vechmaal, buiten het eigenlijke Mergelland. Het zijn ondergrondse groeven waar Maastrichts tufkrijt werd gedolven als bouwsteen en bodemverbeteraar. De groeven bestonden al in 1303 en zijn vermoedelijk even oud als de meer bekende mergelgrotten onder de Sint-Pietersberg bij Maastricht. Ze werden volgens de kamer- en pijlermethode met een rendement van 80% ontgonnen. De bouwsteenexploitatie door de dorpsgemeenschap liep begin 19de eeuw naar zijn einde. In de 20ste eeuw werden ze kortstondig gebruikt voor champignonteelt maar ze zijn nu vooral bekend als vleermuizenreservaat. Grotplannen werden oorspronkelijk ter ondersteuning van de vleermuizeninventarisatie opgemaakt, maar werden ten dele hermeten om in te passen in een Digitaal Hoogte Model.

De bouwstenen bestaan uit Maastrichtersteen, silex en tauw. Tauw is een harde fossielrijke, gedeeltelijk verkiezelde kalksteen die als ruwbehouwen bouwsteen werd gebruikt, tevens voldoende typisch voor het Krijt uit Vechmaal om tot herkomstbepaling over te gaan. Bouwstenen werden gebruikt in het Loons gebied tussen Tongeren en Sint-Truiden vanaf de 13de eeuw, met culminatie in de 15-16de eeuw. Historisch bouwsteengebruik bevestigt dus de schriftelijke historische bronnen.

Kalksteen werd gewonnen uit twee verschillende laagpakketten in de Formatie van Maastricht, met weerslag op gebruik, exploitatiewijze en grotmorfologie. De Kalksteen van Nekum is over 8 m ontsloten en bestaat uit fijne kalkareniet met talrijke fossielgruislagen (voornamelijk zee-egels, kalkkokerwormen en oesters), waarin de Horizont van Kanne een continue laag uitmaakt, met grote complete zee-egels (twee *Hemipneustes* niveaus boven en onder de Horizont van Kanne), en met twee onderscheiden lagen met silex en tauw. De jongere Kalksteen van Meerssen is over 4 m ontsloten en bevat grovere kalkareniet en talrijke hardgrounds. De Formatie van Maastricht in Vechmaal is goed vergelijkbaar met het typegebied rond Maastricht en werd in hetzelfde sedimentatiebekken afgezet. Vooral de bovenste helft van de Kalksteen van Nekum is geschikt als bouwsteen. De grotten vertonen rechtgezaagde wanden in deze lagen. De Kalksteen van Meerssen en de onderste helft van de Kalksteen van Nekum werden enkel als bodemverbeteraar gebruikt. De galerijen in deze lagen vertonen een boogvormige doorsnede.

De afstand tussen dekterrein en grondwaterpeil en de aanwezigheid van bouwsteen in dit interval bepalen de ligging van de grotten en de exploitatiewijze. Het Maastrichts tufkrijt vertoont een NW-SE en WSW-ENE diaklaasnetwerk volgens het regionale breukpatroon; de lagen hellen af naar het noordoosten en wordt verdiept door een normaalbreuk met verticale sprong van 4 m. Kleinschalige karstwerking is wijdverspreid, met zowel oppervlakkige werking of exokarst, herkenbaar in de vorm van oplossingsdolines, als interne oplossing of endokarst, herkenbaar in de vorm van alveolen, uitschulpingen, draineringskanaaltjes en kleine tunnels. De endokarst in nu inactief maar werd geleid door spleten en doorlatendheidsvariaties in de poreuze kalksteenlagen en kwam vermoedelijk tot stand vóór de afsluitende Paleogene lagen (Gelinden mergels, Formatie van Heers, en tongeriaans plakzand, Formatie van St.-Huibrechts-Hern) werden afgezet. Gelinden mergels zijn enkel als verbrokkelde residuele lenzen bewaard in oplossingsdolines gevuld met tongeriaanzand. Uit de observaties in Vechmaal kan worden afgeleid dat niet spleetporositeit maar wel geconnecteerde karstholtes aan de oorsprong liggen van de soms bijzonder hoge wateropbrengst in de toplagen van het Maastrichts tufkrijt. Wegens de ligging tegen de waterscheiding tussen Maas- en Scheldebekken staat het grondwater relatief hoog en lopen delen van grotten onder water volgens een meerjarige periodiciteit die de neerslagevolutie volgt.

De grotten liggen op geringe diepte onder de oppervlakte en het dak van kalksteenlagen is zeer dun, van de grootteorde van enkele meters, bovendien aangetast door vele dolines of orgelpijpen. Met name de grotten in de Kalksteen

van Nekum zijn instabiel en voor een deel reeds ingestort of ontoegankelijk. Een grot (Champignonskuil) is zelfs grotendeels dichtgeslibd door modderstromen vanuit actieve instortingstrechters. Dakbreuk lijkt de voornaamste reden voor instortingen, met beperkte en gelokaliseerde veiligheidsrisico's, en niet zozeer de gevaarlijker pijlerbreuk, verantwoordelijk voor de catastrofale instortingen in het Mergelland. Een risicozone bij de ingang van de Hinnisdael I grot verdient nader onderzoek.
De Waterkuil vertoont talrijke geologische en hydrologische kenmerken . In het bijzonder de Hardground van Caster (grens tussen Kalksteen van Nekum en Meerssen) is op spectaculaire wijze ontsloten. Deze grot vertoont weinig stabiliteitsproblemen en ligt daarenboven langs een wandelroute zodat enige toeristische-educatieve ontwikkeling met erkenning als geosite hier mogelijk is, op natuurlijke wijze ingeperkt door de hoge grondwaterstand. De andere grotten blijven best behouden als vleermuizenreservaat, op voorwaarde dat ook hun aardwetenschappelijke waarden behouden blijven. De grote hoefijzervormige depressie van de Mergelkuilen van Hinnisdael blijft enigmatisch en het voorwerp van zowel historische als geologische speculatie.

Sleutelwoorden: Maastrichtiaan, sedimentologie, stratigrafie, tektoniek, karst, ondergrondse groeve, bouwsteen, grondwater, risico's, geosite.

RÉSUMÉ. Les carrières souterraines d'Hinnisdael à Vechmael (commune d'Heers, Hesbaye limbourgeoise), contribution à l'étude géologique du Crétacé.
Dans le sud du Limbourg, à l'ouest de Tongres, les carrières souterraines creusées dans le Maastrichtien sont caractéristiques de l'exploitation de la craie crétacée comme pierre de construction et comme source d'engrais. A notre connaissance, elles sont les dernières carrières souterraines encore accessibles dans le bassin de l'Escaut. Mentionnées dès 1303, elles seraient donc contemporaines aux exploitations mieux connues de la Montagne Saint-Pierre, à proximité de Maastricht.
L'exploitation des carrières souterraines d'Hinnisdael a graduellement pris fin au début du XIX^{e} siècle. Les galeries ont été souvent réaménagées en champignonnières pendant le XX^{e} siècle. Aujourd'hui, elles sont classées en réserve biologique et abritent une population importante de chauve-souris. Huit carrières sont répertoriées sur le site d'Hinnisdael. Sept ont été topographiées une première fois en 1990-91 par des chiroptologues. Les plans de deux carrières ont été levés à nouveau et insérés dans un modèle digital de terrain pour le calcul des volumes exploités.
Les pierres naturelles de construction, pierre de Maastricht (ou pierre de sable), silex et « tawes » (roche dure résultant de la silicification partielle de bancs fossilifères) ont été principalement utilisées dans le Comté de Looz, entre Tongres et Saint-Trond.
Deux séquences dans la formation de Maastricht ont été exploitées, donnant une qualité de roche différente. Le Calcaire de Nekum, visible sur 8 m d'épaisseur, est composé de calcarénites fines contenant fréquemment de lits de fossiles remaniés (surtout composé d'échinides, d'huîtres et de serpules). Le niveau de Kanne représente un lit très constant, riche en serpules, dans la partie supérieure de l'unité. De grands échinides complets sont concentrés dans deux niveaux à *Hemipneustes* de part et d'autre du niveau de Kanne. Le Calcaire de Nekum contient deux séquences séparées contenant de silex et des tawes. Utilisé dans des monuments historiques à partir du XIII^{e} siècle et culminant aux XV-XVI^{es} siècles, ce dernier permet d'y tracer l'origine des pierres de construction. L'usage et la distribution des pierres de construction historiques confirme donc les sources écrites. Le Calcaire de Meerssen, plus récent, affleure sur 4 m et contient de calcarénites plus grossières et plusieurs 'hardgrounds' (sols marins endurcis). Le Calcaire de Maastricht à Vechmael ressemble fortement au stratotype près de Maastricht, formant une aire de sédimentation commune. La partie supérieure du Calcaire de Nekum se prête à l'exploitation de la roche comme pierre de taille ; jusqu'à 80% de la roche en place a été extraite. Les galeries qui l'ont exploité présentent des parois sciées et ont une section rectangulaire à ogivale là où la pression de terrain s'approchait de la résistance mécanique du toit. Le Calcaire de Meerssen et la partie inférieure du Calcaire de Nekum servaient uniquement comme engrais de même titre que la marne, nom populaire ('mergel') désignant la totalité de calcaires crétacés. Les galeries creusées dans ces couches présentent des sections courbées.
La distance entre la base des morts-terrains et la nappe aquifère, ainsi que la stratigraphie (ou qualité de la roche), déterminent la localisation des carrières et leurs modes d'exploitation. Le Calcaire de Maastricht est affecté par un réseau de diaclases. Celui-ci est représentatif du système de failles calédoniennes du Massif de Brabant, proche de sa terminaison orientale. Le pendage des couches est en direction du NE. Une faille normale inactive renforce cet enfoncement et se marque par un décrochage de 4 m. Une karstification est apparente en de nombreux endroits, malgré la porosité très élevée des calcarénites. L'exokarst se présente sous forme de dolines de dissolution pouvant être prolongées par des «tuyaux d'orgue» (racine du manteau d'altération de forme tubulaire). Localement très nombreuses, elles ont limité l'extension de l'exploitation souterraine. L'endokarst fossile a été guidé par les fissures ou des variations stratiformes de perméabilité. Il se compose d'alvéoles et coupoles sculptées, d'anastomoses et de couloirs cylindriques, formées en régime noyé. Ce paléokarst a probablement débuté au Paléocène. Il serait à l'origine d'une partie de la transmissivité

importante observée régulièrement dans l'aquifère maestrichtien, généralement attribuée à la fissuration ou des variations de porosité. Le Calcaire de Maastricht est recouvert de sables argileux tongriens (Formation de St.-Huibrechts-Hern, Oligocène), localement aquicludes et renfermant parfois, dans des dolines, des vestiges des Marnes de Gelinden (Paléocène). En tenant compte de la position des carrières dans un paysage hesbignon peu accidenté, la nappe aquifère est en position élevée. Sa zone de battement s'étend sur 2 m. Elle suit l'évolution pluriannuelle de la précipitation et inonde régulièrement une grande partie des réseaux souterrains.
Les cavités artificielles creusées dans le Calcaire de Nekum autour de la dépression des « Mergelkuilen » sont partiellement effondrées ou remblayées. Les galeries se situent à faible profondeur et le toit de calcaire devant supporter le poids des morts-terrains est souvent très mince (de quelques mètres). De plus, ce dernier est affaibli par les phénomènes de dissolution. Lorsque la base des dolines est recoupée par les exploitations, les produits d'altération piégés au sein de ces dolines peuvent se répandre dans les galeries. La rupture du toit, après exploitation, peut provoquer des affaissements ponctuels de surface qui peuvent se confondre avec des dolines.
Le risque d'effondrement affectant de grandes surfaces par rupture instantanée d'une série de piliers est considéré comme faible, bien qu'une zone près de l'entrée actuelle de la grotte Hinnisdael I mérite une plus grande surveillance. Des points d'entrée d'eau (dolines recoupées ou effondrements miniers) permettent un transport de sédiments dans les galeries souterraines et colmatent peu à peu les passages. Ceci est surtout observé dans la carrière d'Hinnisdael II où les pertes devraient être bouchées pour maintenir les valeurs biologiques et géologiques de ce site.
La grotte d'Hinnisdael VII (Waterkuil) présente de nombreux phénomènes géologiques et hydrologiques de valeur didactique. Elle montre de façon spectaculaire le développement du Hardground de Caster, à la limite entre les calcaires de Nekum et de Meerssen. Grâce au profil en ogive et stabile, à la présence de couches plus dures et à un toit plus épais et régulier, il y a peu de problèmes de stabilité. Cette grotte est d'accès aisé à coté d'un sentier touristique et est propriété communale. Elle pourrait donc permettre le développement d'initiatives de vulgarisation scientifique et la création d'un géosite.

Mots-clés: craies, Maastrichtien, sédimentologie, stratigraphie, tectonique, karst, aquifère, pierre naturelle de construction, risques, géosites.

SUMMARY. The underground quarries of Hinnisdael in Vechmaal (commune Heers, Belgian Limbourg, contribution to the geological study of the Cretaceous.
Numerous underground quarries in the Maastrichtian limestone of the 'Mergelland', the scenic region in the south of the Belgian and Dutch provinces of Limburg, between the cities of Tongeren and Valkenburg have been exploited by room and pillar mining for building stones and soil conditioner. The Hinnisdael quarries are the only accessible artificial caves to the west of this area in the Scheldt basin. The quarries were already in existence in 1303 and thus have the same age as the much better known caves in St.-Peters' Mountain south of the city of Maastricht. Altogether 80% of the rock volume has been excavated. Underground quarrying faded out early in the 19th century; during the 20th century they were briefly used for cultivation of mushrooms and they actually serve as a bat sanctuary. Eight artificial caves have been identified, seven of which were mapped in 1990-91 by a working group for surveying hibernating bats, which are protected. Two caves were remapped and integrated in a digital terrain model for calculation of excavated volumes.
The natural building stones produced from this site were soft calcareous Maastricht stone, flintstone and 'tauw', a peculiar rock type composed of partially silicified fossil beds. Tauw is very typical for the Vechmaal area and could be used for determining the distribution of building stones in space and time. Historic use was regional and concentrated within the boundaries of the old county of Looz (Borgloon), in between the cities of St.-Truiden and Tongeren. The 13th century age of the caves is confirmed by use of building stones, which date the main phase of exploitation as 15-16th century.
Two outcropping members of the Maastricht Formation consist of slightly different rock types, hence leading to different exploitation methods and cave morphologies. The older Nekum Limestone is exposed over 8 m and consists of cream-yellow coloured fine-grained calcarenites with frequent fossil debris beds. Macrofossils are mostly composed of echinoids, serpulids and oysters. The Kanne Horizon constitutes a persistent fossil bed, rich in serpulids near the top of the unit. Two levels with complete large echinoids (*Hemipneustes* beds) occur above and below the Kanne Horizon. Flint and tauw also occur in two distinct horizons. The younger Meerssen Limestone is exposed over 4 m and consists of orange-yellow coloured coarser-grained calcarenites and several hardgrounds. The Maastricht Limestone in Vechmaal possesses the same facies as in the type area and clearly formed in the same depositional basin. The upper part of the Nekum Limestone was suitable as building stone. Caves in this stratigraphic level show sawed walls and rectangular sections, becoming parabolical where lithostatic pressure approximated the mechanical strength of the roof. The Meerssen Limestone and the lower part of the Nekum Limestone served as soil conditioner and fertiliser, hence the use of the local name 'mergel' (marl) for all Cretaceous limestones. Galleries caved out in these levels present an arched form. The stratigraphic level (or rock quality) thus determines the location of the caves and the type of exploitation, in

combination with the distance between the base of the overburden and the groundwater level.
The Maastricht Limestone is traversed by a network of fractures with directions inherited from the underlying Brabant Massif, and probably related to the creation of pull-apart basins along the eastern boundary of the Brabant Massif. Some fractures develop into normal faults, with measurable throw up to 4 m. Local fault basins have been formed with strike of bedding NW-SE and dip to the northeast, contrary to the regional dip towards the NNW. Despite the large porosity of the calcarenites, small-scale karst development is widespread. Exokarst is characterised by dissolution sinkholes extending downwards as 'geological organ pipes', which can become so numerous as to prevent further extension of the caves. The endokarst is guided by fractures and/or stratabound permeability barriers such as hardgrounds and is morphologically characterised by sculpted cupolas, alveoles, anastomoses and cylindrical corridors, originating in the phreatic zone. It is a paleokarst of probable Paleocene age that has become inactive, due to its position above the water table. It is suggested that this paleokarst in the top Cretaceous, rather then fissures, is largely responsible for the extremely high transmissivities regionally encountered in the maastrichtian aquifer. The Maastricht Limestone is covered by clayey sands of the Oligocene St.-Huibrechts-Hern Formation, which locally act as a permeability barrier. Towards the base of these sands, remnants of Paleocene Gelinden Marl are found occasionally as the marl is only preserved in some dissolution sinkholes. Groundwater is observed at the base level of the caves, showing variations with 2 m amplitude, related to the long-term evolution of precipitation, and thus temporarily blocking access to parts of the caves.
The caves exploiting the Nekum Limestone around the enigmatic depression of 'Mergelkuilen' are particularly prone to roof collapse, ultimately leading to collapse sinkholes, or to sedimentation. The caves are situated at very short distances below the overburden and roof collapse due to creep presents a considerable hazard, in addition to the many natural sinkholes. On the other hand, the more catastrophic instantaneous rockburst due to failure of pillars is less likely, although the entrance area of the main cave Hinnisdael I merits close monitoring. Open sinkholes connected to the Hinnisdael II cave allow mudflows to enter the cave and progressively fill it up. Already 4 m of loamy sediment has been deposited and it is urgent to block further inflow to maintain the biological and geological values of this cave.
The cave Hinnisdael VII presents the best potential for touristical-educational development, contrary to the other caves, which are best preserved as bat sanctuaries on condition that their geological and mining heritage is also maintained. The cave Hinnisdael VII displays spectacular views of the Caster Hardground at the boundary between the Nekum and Meerssen Limestones, among many other geological and hydrological phenomena with didactic qualities. Damage to the cave ecosystem can be constrained because of the high groundwater level inside the cave. This cave has the most stable roof conditions and is furthermore located on communal ground along a touristical trail. Therefore it is proposed as a new geosite.

Key-words: underground quarries, Maastrichtian, sedimentology, stratigraphy, tectonics, karst, groundwater, natural building stone, risks, geosites.

ZUSAMMENFASSUNG. Die Mergelgruben von Hinnisdael zu Vechmaal (Gemeinde Heers, Limburgs Haspengau), ein Beitrag zur geologischen Kreideforschung.
Die Mergelgruben von Hinnisdael liegen westlich von Tongeren im Dorf Vechmaal, außerhalb des eigentlichen Mergellandes. Es sind unterirdische Steinbrüche, in denen Maastrichter Tuffkreide als Naturstein und Bodenverbesserer abgebaut wurde. Die Steinbrüche existierten schon 1303 und sind vermutlich genauso alt wie die bekannteren Mergelgruben unter dem St.-Petersberg bei Maastricht. Der Mergel ist in den Gruben durch den so genannten Kammer-Pfeiler-Bau (Room & Pillar Mining) zu 80 % abgebaut. Die Förderung durch die Dorfgemeinschaft endete zu Beginn des 19. Jahrhunderts, im 20. Jahrhundert wurden die Steinbrüche kurzzeitig für die Champignonzucht genutzt. Heute sind sie vor allem als Fledermausquartier bekannt. Die Grubenpläne wurden ursprünglich für die Fledermausinventarisierung angefertigt, die Steinbrüche wurden jedoch teilweise erneut vermessen, um sie in ein digitales Geländemodell einzufügen.
In den Steinbrüchen wurde Maastricher Stein, Feuerstein und Tauw gefördert. Tauw ist ein harter, fossilienreicher, teilweise verkieselter Kalkstein, der als grob behauener Baustein verwendet wurde. Da er für die Kreide aus Vechmaal typisch ist, ist es möglich damit die Verbreitung der Natursteine zu bestimmen. Bausteine wurden seit dem 13. Jahrhundert im Loonsgebiet zwischen Tongeren und St. Truiden verwendet, die Nutzung hatte ihren Höhepunkt im 15. –16. Jahrhundert. Die historische Natursteinnutzung bestätigt also das in den historischen Quellen erwähnte Alter der Steinbrüche.
Der Kalkstein wurde aus zwei verschiedenen Lagen der Maastricht Formation gewonnen, was sich sowohl auf die Nutzung als auch auf die Förderungsweise und die Höhlenmorphologie auswirkte. Der Nekumer Kalkstein ist über 8 m freigelegt und besteht aus feinem Kalkarenit mit zahlreichen Fossilschuttlagen (hauptsächlich Seeigel, Serpuliden und Austern). Der Horizont von Kanne formt darin eine durchgehende Schicht. Große vollständige Seeigel sind in zwei *Hemipneustes* Schichten oberhalb und unterhalb des Horizonts von Kanne enthalten. Zudem sind zwei Schichten mit Silex und Tauw erkennbar. Der jüngere Meerssener Kalkstein ist über 4 m freigelegt und enthält gröberen Kalkarenit

und zahlreiche Hartgrundschichten. Die Maastricht Formation in Vechmaal ist gut mit dem Typusgebiet rundum Maastricht zu vergleichen und wurde in demselben Sedimentationsbecken abgelagert. Vor allem die obere Hälfte des Nekumer Kalksteins ist als Baustein geeignet. Die Steinbrüche weisen in diesen Schichten gerade gesägte Wände auf. Der Meerssener Kalkstein und die untere Silex-führende Hälfte des Nekumer Kalksteins wurden nur als Bodenverbesserer verwendet. Die Gänge in diesen Schichten haben einen bogenförmigen Querschnitt.
Der Abstand zwischen Deckgebirge und Grundwasserspiegel sowie die Lage des Gesteins bestimmen also den Ort der Gruben und die Art der Gesteinsförderung. Dem regionalen Bruchmuster entsprechend zeigt die Maastrichter Tuffkreide ein NW-SE und WSW-ENE streichendes Kluftnetzwerk. Die Schichten fallen nach Nordosten ein und werden durch eine vertikale Abschiebung um 4 m versetzt. Verkarstung im kleinen Umfang ist überall vorhanden, sowohl als Oberflächenkarst (Exokarst) in Form von Korrosionsdolinen, als auch als unterirdischer Karst (Endokarst) in Form von Alveolen, Drainagekanälchen und kleinen Tunneln. Der Endokarst, der sich entlang von Klüften und Durchlässigkeitsunterschieden im porösen Kalkstein bildete, wird heute nicht mehr aktiv weitergebildet. Er entstand vermutlich bevor die abschließenden paläogenen Schichten (Gelinden Mergel, Heers Formation, St.-Huibrechts-Hern Formation) abgelagert wurden. Gelinden Mergel ist nur in einigen Korrosionsdolinen erhalten geblieben, die mit jüngerem Sand aufgefüllt sind. Aus Beobachtungen in Vechmaal kann man schließen, dass nicht nur Kluftporosität sondern auch miteinander verbundene Hohlräume im Karst die hohe Wasserdurchlässigkeit in den höheren Schichten der Maastrichter Tuffkreide verursachen. Durch die unmittelbare Nähe zur Wasserscheide von Maas und Schelde ist der Grundwasserspiegel in den Steinbrüchen ziemlich hoch. Der langjährigen Niederschlagsentwicklung entsprechend werden Teile der Gruben in regelmäßigen Abständen überschwemmt.
Die Gruben liegen in nur geringer Tiefe unter der Oberfläche, das Deckgebirge aus Kalkstein ist nur einige Meter dick und zudem mit Dolinen zersetzt. Besonders jene Gruben, die sich im Nekumer Kalkstein befinden, sind instabil und bereits teilweise eingestürzt oder nicht mehr zugänglich. Die Grube „Champignonskuil" ist sogar großenteils mit Schlamm aus aktiven Einsturzdolinen zugeschwemmt. Diese Einstürze im Mergelland werden scheinbar hauptsächlich durch Firstbruch und nicht durch Pfeilerbruch verursacht, jedoch mit nur beschränkten und lokalen Sicherheitsrisiken. Eine Risikozone im Eingangsbereich der Grube „Hinnisdael I" sollte jedoch genauer untersucht werden.
Die Grube „Waterkuil" zeigt zahlreiche interessante geologische und hydrologische Merkmale. Insbesondere der Caster Hartgrund (die Grenze zwischen Nekumer und Meerssener Kalkstein) ist hier eindrucksvoll aufgeschlossen. Die Grube zeigt nur geringe Stabilitätsprobleme und liegt zudem an einem Wanderweg. Daher ist eine touristisch-pädagogische Erschließung mit Anerkennung als Geotop möglich. Eine Begehung der gesamten Grube ist aufgrund des hohen Grundwasserspiegels nicht möglich und beschränkt sich auf den Eingangsbereich. Die anderen Gruben sollten am besten weiterhin als Fledermausquartier dienen, solange ihre geowissenschaftlichen Besonderheiten erhalten bleiben. Die Entstehung der hufeisenförmigen Absenkung bei den Mergelgruben von Hinnisdael bleibt weiterhin ein Rätsel und liefert Stoff für sowohl historische als auch geologische Spekulationen.

Stichwörter: Maastrichtium, Sedimentologie, Stratigraphie, Tektonik, Karst, Untertagesteinbruch, Baustein, Grundwasser, Risiken, Geotop.

DANKWOORD

Deze studie is op korte tijd gerealiseerd, tijdens één zomerseizoen veldwerk, en dit was niet mogelijk zonder de medewerking van een groot aantal personen:

Jacques Fairon (Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen) die systematisch vleermuisonderzoek in Vechmaal gestart heeft, de eerste grotplannen heeft gemaakt en zijn dossier over Vechmaal ter beschikking stelde;

Camille Ek (Universiteit Luik) die de aanzet heeft gegeven tot hernieuwd karstonderzoek van het Krijt in Haspengouw en het Land van Herve;

Roland Dreesen (VITO) voor de petrografische ondersteuning en vooral als bezieler van de Werkgroep Geologie van de Limburgse Koepel voor Natuurstudie (LIKONA) die de aardwetenschappelijke waarden in Limburg terug in het daglicht tracht te brengen;

Ward Cielen (LIKONA Werkgroep Geologie), Frans Moorkens (Belgische Geologische Dienst) en Roger Vandenvinne (Club de Recherche Spéléo Ourthe-Amblève - CRSOA) voor de handboringen;

Albert Briffoz (CRSOA) voor allerhande metingen in de Waterkuil;

Speleologieclub van de KU Leuven – SPEKUL voor de topografische opmeting (Sam Borloo, Martine Bouwens, Liesbeth Breesch, Bernard Butaye, Anja Crommelynck, Tom Dedroog, David De Roest; Katie D'haene, Annick De Troyer, Johan Frankie, Luc Langen, Rotana Lim, Koen Mandonx; Nicola Mrose, Leen Stremerch, Dries Uyttendaele, Johan Vanneste, Jeroen Verspreet en Wolfgang Zillig) en voor de fotografie (David De Roest, Johan Frankie en Jeroen Verspreet);

Marcel Ruts (VITO) voor GPS-metingen;

Julien Dahlen voor toelating tot reproductie van de oorspronkelijke grotplannen;

Julien Dahlen en Benny Odeur voor informatie over het werk van de Vleermuizenwerkgroep (Natuurpunt);

Marc Neven en Julien Geuten (Gemeentebestuur Heers) voor steun vanuit de gemeente;

Ere-burgemeester Arnold Dewelf en Julien Geuten (Vechmaal) voor de uiteindelijk toch omvangrijke historische informatie;

Joseph Van Orsmael (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Afdeling Natuurlijke Rijkdommen en Energie) voor de inkadering in de karteeropdracht van het Krijt in het Vlaams Gewest;

Katleen Van Baelen (VITO) voor het efficiënte werk bij het uittekenen van de grotplannen, ondanks de voortdurende aanvullingen;

Marleen De Ceukelaire, Florence Dumont, Jacques Herman, Pascal Vancampenhout en Olivier Wambacq (Belgische Geologische Dienst, BGD) voor dienstverlening bij de afwerking van het manuscript;

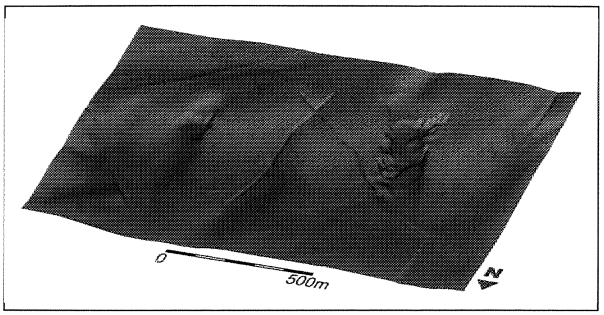
Nicola Mrose (SPEKUL) met medewerking van Sandra Hildenbrand (VITO) voor de Duitse vertaling;

Peter De Geest (VUB), Roland Dreesen (VITO), Wim Dubelaar (TNO-Utrecht) en Kris Piessens (BGD) voor het nalezen van het manuscript.

1. Inleiding

Het kerkdorp Vechmaal (gemeente Heers) is gelegen in Droog Haspengouw, temidden van een open en dunbevolkt agrarisch landschap. Het golvend landschap ligt tussen 75 m en 125 m hoogte boven zeeniveau en helt geleidelijk af naar het noordwesten, vertrekkend van de waterscheidingskam tussen Maas- en Scheldebekken, meer specifiek tussen Jeker en Molenbeek-Herkebeek. De waterscheiding wordt gevolgd door de Romeinse Kassei, nu de verbinding tussen Tongeren en Borgworm, in de tijd van de Romeinen tussen Keulen en Bavay, en vormde hier eeuwenlang de grens tussen Loons en Luiks gebied waarmee lokaal ook de taalgrens tot stand gekomen is en Vechmaal[1] steeds Limburgs is gebleven.
Droog Haspengouw heeft zijn uitzicht te danken aan de dikke leemlaag en aan de aanwezigheid van waterdoorlatend krijt[2] in de ondergrond. De grondwatertafel bevindt zich buiten de dalbodems op grote diepte zodat een deel van de krijtlagen droog staat. Kleine depressies in dit gebied geven toegang tot de Krijtlagen, in de volksmond beter bekend als mergel[3]. De Mergelkuilen van Hinnisdael[4] [5], genoemd naar het adellijk geslacht dat hier zijn thuisbasis had, vormen het theater waarrond een reeks mergelgrotten[6] gesitueerd zijn (Figs. 1-2).

De grotten van Vechmaal zijn gelegen langs een holle weg en rond de rechthoekige depressie van Hinnisdael die in



Figuur 1. Digitaal Hoogte Model van het zuidelijk deel van het dorp Vechmaal in 3D zicht, gericht naar het zuiden, met de hoefijzervormige depressies van de Patrijnenkuil links en de Mergelkuilen van Hinnisdael rechts in beeld en de Romeinse Kassei als lineair element op de waterscheiding tussen Jeker (Maasbekken) en Herk (Scheldebekken) linksboven in beeld (bron GIS-Vlaanderen).

weiland is omgezet en door beboste stroken is omgeven, ongeveer 750 m ten zuiden van de laatste huizen van de dorpskern. Ze zijn te bereiken langs de Sint-Martinusstraat (vroeger Haagstraat genaamd), de verbindingsweg tussen Vechmaal en de Romeinse heirbaan Tongeren - Oreye (Oerle) - Waremme (Borgworm), en de Borgstraat, een veldweg die 150 m voorbij het kruispunt van de St.-Martinusstraat met de Tongersestraat in zuidoostelijke richting afbuigt. Bij het begin van de holle weg, vlak bij de grotten is een picknickplek voorzien.

---

1 In oude documenten, en niet alleen in deze die in het Latijn of het Frans waren opgesteld, werd de naam Vechmaal meestal als Fimal(e) of Fymal(e) weergegeven. Fimal is de gebruikelijke, zij het niet officieel erkende Waalse benaming van het dorp.

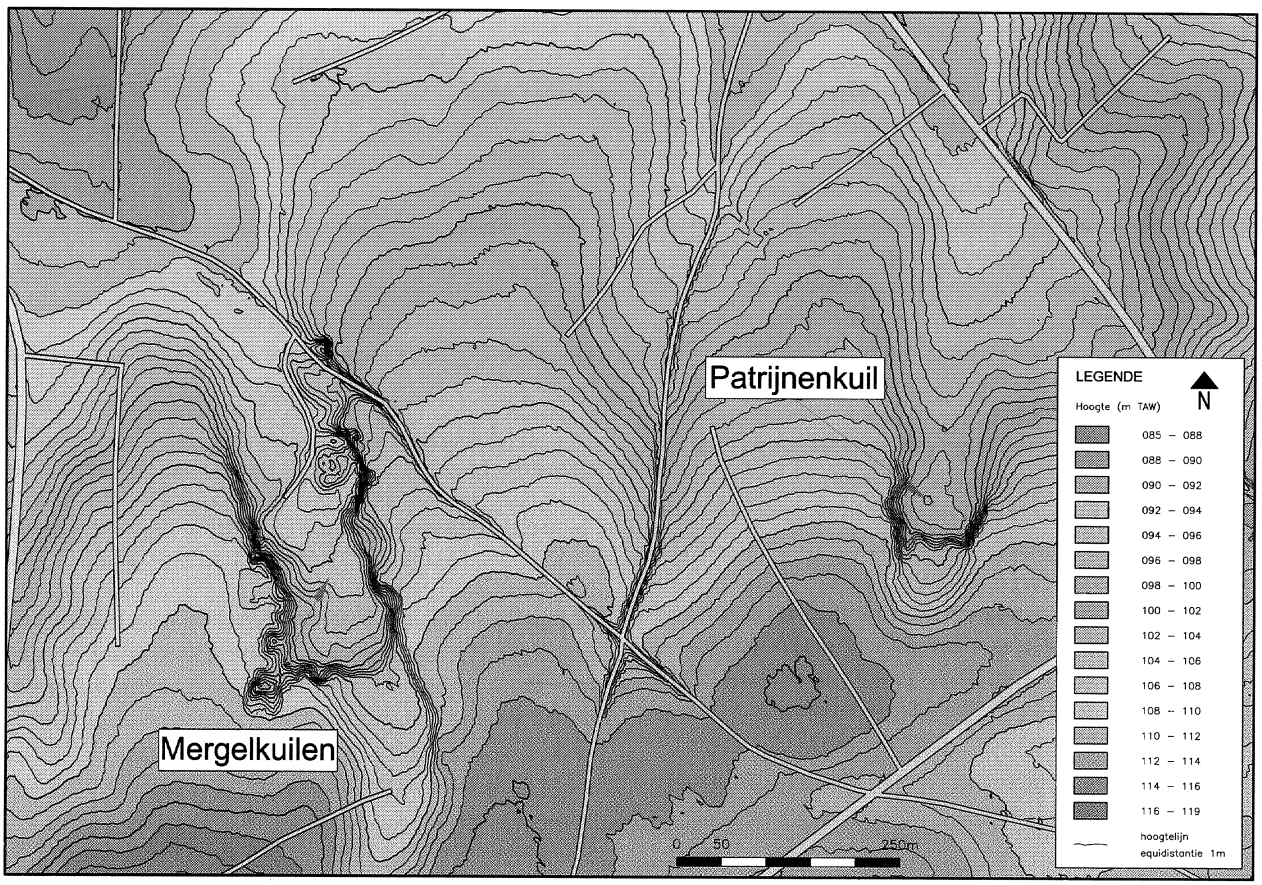
2 Krijt heeft een dubbele betekenis als tijdsaanduiding en als gesteentetype. Het Krijt is een geologisch tijdperk met als tijdsduur 65,5-145,5 miljoen jaar (Ma). Het Maastrichtiaan (65,5-70,6 Ma) is de internationaal erkende jongste etage van de Krijtperiode (www.stratigraphy.org). Het witte schrijfkrijt is een gesteente, waaraan de tijdseenheid zijn naam te danken heeft. Meer algemeen stelt het krijt ook alle, doorgaans kalkrijke gesteenten voor die hier tijdens het Krijt als periode zijn afgezet, of waarvan de afzetting ook na de Krijt/Tertiair grens nog doorging. Het Maastrichts tufkrijt (of Formatie van Maastricht als kartografeerbare eenheid) is een gesteentebenaming voor de poreuze, korrelige lagen die lokaal zijn afgezet tijdens het laat-Maastrichtiaan en het vroegste Paleoceen, en stelt dus geenszins een exact tijdsequivalent van het Maastrichtiaan voor.

3 Mergel heeft in de geologische nomenclatuur een andere, meer strikte betekenis van kalkhoudende klei of niet geheel versteende kleiige kalksteen. Traditioneel wordt het begrip echter gedefinieerd door zijn toepassing: mergel dient voor kalkbemesting en het volkse woordgebruik sluit hier op aan. Alle kalkige gesteenten uit het Krijttijdperk die in Limburg dagzomen worden bijgevolg mergel genoemd, zowel tufkrijt (kalkareniet) als echt krijt. In dit geval gaat het om tufkrijt, een populair-wetenschappelijke benaming voor de beige-gele, stofferig aanvoelende, macroporeuze en zwak verkitte kalkareniet uit de Formatie van Maastricht, die onder zijn Franse vorm 'tuffeau' of 'tuf calcaire' al eeuwen meegaat (Vander Maelen, 1835) en die op het stofferig-poreuze uitzicht na geen uitstaans heeft met vulkanische tuf(steen).

4 Meerdere spellingswijzen zijn tegenwoordig in gebruik: Hinnisdael, Henisdael, Henisdaal, en in het verleden nog veel meer met eveneens varianten op Heijnsdael. De benaming Hinnisdael komt overeen met de genealogische oorsprong van de plaatsnaam. Op advies van de heer A. Dewelf, ereburgemeester en auteur van de meeste historische geschriften over de gemeente Vechmaal wordt deze benaming verder aangehouden, tenzij expliciet wordt verwezen naar documenten met andere spelling. Andere benamingen zijn fonetische aanpassingen en spellingsvereenvoudigingen.

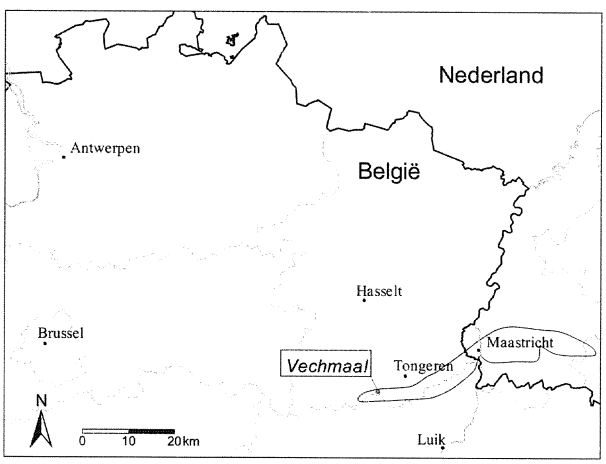
5 Naast de benaming Mergelkuilen die tegenwoordig wordt gebruikt en op stafkaarten wordt vermeld, staan de vroegere benamingen "Hinnisdaelcuylen" of "Bergkuilen" (Dewelf et al., 1978, p. 109). Het begrip kuil staat voor een groeve of uitgraving, berg kan al op een helling slaan en omvat al hetgeen ondergronds in zo een helling voorkomt. Bergkuil is een omschrijving die in het Mergelland wel meer gebruikt wordt.

6 Voor puristen is het woord mergelgrot een dubbel verkeerde benaming: mergel is petrografisch een ander soort van gesteente en een grot is een natuurlijk fenomeen en geen ondergrondse groeve. Het begrip Bergkuil is dus een meer realistische weergave, maar uit het dialect voorkomend. Daarom blijven wij het begrip mergelgrot gebruiken, dat nauw aansluit bij de belevingswaarde van onderaardse 'krochten' en ook in het toeristisch-recreatieve domein algemeen gebruikt wordt.



Figuur 2. Digitaal Hoogte Model van de Mergelkuilen van Hinnisdael en de Patrijnenkuil in planzicht, noorden naar boven georiënteerd (bron GIS-Vlaanderen).

Mergelgrotten werden uitgegraven voor de winning van bouwsteen of van bodemverbeteraars voor 'uitgemergelde' gronden, en zijn niet als natuurlijke grotten ontstaan. Intussen zijn er toch aanwijzingen voor natuurlijke kleinschalige karstverschijnselen gevonden. Het zijn dus ondergrondse groeven. Het voorkomen van mergelgrotten is gebonden aan het ontsluitingsgebied van het Maastrichts tufkrijt, in het Mergelland tussen Valkenburg en Tongeren. De grootste concentratie komt voor rond Maastricht, met de dorpen Ternaaien (Lanaye, gem. Visé), Eben-Emael, Wonk (gem. Bassenge), Kanne, Zichen-Zussen-Bolder, Valmeer en Millen (gem. Riemst) aan Belgische kant (Fig. 3). Vechmaal ligt ten westen van dit kerngebied en is niet in de klassieke inventarissen opgenomen (Felder & Bosch, 2000; Stevenhagen, 2003; Walschot, 2002; Orbons, 2005). De mergelgrotten van Hinnisdael omvatten acht verschillende gangenstelsels van wisselende omvang en toegankelijkheid. Deze worden soms beschreven als de enige van het Scheldebekken, maar dit is zonder de momenteel vergeten en verdwenen grotten elders in Vechmaal en het naburige Horpmaal gerekend. Verder zijn er nog de Brabantse grotten, de "eeuwenoude" grotten van Folx-les-Caves die nu voor toerisme opengesteld zijn (Boyen, 1989; Groessens, 1998), de grotten van Biez (Grez-Doiceau) die tussen 1650 en 1850 voor kalkproductie werden ontgonnen en nu als waterreservoir gebruikt worden en de grotten in het Bekken van Bergen, waarvan La Malogne ooit uitgebaat voor de fosfaatwinning nu toeristisch toegankelijk is (Leclercq & Bouko, 1985). Ook in Luiks Haspengouw zijn ondergrondse fosfaatwinningen in de Krijtlagen welbekend, met kerngebied rond Momalle (Calembert, 1947) en prospectieputten tot in de omgeving van Landen (persoonlijke mededeling ereburgemeester A. L'Homme).



Figuur 3. Ligging Mergelgrotten van Vechmaal en schetsmatige weergave van de dagzoom van de Formatie van Maastricht (naar Dubelaar et al., 2006).

De beschikbare kennis over de mergelgrotten van Vechmaal komt hoofdzakelijk uit de plaatselijke overlevering en historische bronnen (Dewelf et al., 1978) en van berglopers[7] die zich verenigd hebben in een Vleermuizenwerkgroep (Olefs et al., 1991, 1992; Benny Odeur, interne documenten). De grotten van Hinnisdael vormen dank zij een hoge luchtvochtigheid, stabiele temperatuur en rust, zeker boven de onderwaterstaande delen, een gunstige biotoop voor vleermuizen. Ze zijn als een van de eerste vleermuizenreservaten bekend om hun biologische waarde met 11 geïdentificeerde overwinterende vleermuizensoorten (mondelinge informatie J. Fairon; Dahlen, 1992). Rond dit thema werd op 20-21.4.1991 te Vechmaal een nog steeds tot de verbeelding sprekende tentoonstelling georganiseerd (Dahlen, 1991). Het landschap van de Mergelkuilen van Hinnisdael - niet de grotten zelf - is sinds 1985 beschermd. Op verzoek van de Belgische Natuur- en Vogelreservaten (nu Natuurpunt vzw) werden eind 1991 door de Ruilverkaveling Horpmaal in de best toegankelijke grotere grotten Hinnisdael I en Waterkuil hekken geplaatst. Het traliewerk volgens model van Roer (1971; zie ook fig. 5 en foto op de omslag) is open om de vleermuizenvlucht niet te hinderen, maar dit vormt nauwelijks een belemmering voor bezoekers allerhande. De rijkdom aan krijtfossielen is in gespecialiseerde vakkringen geen geheim, waardoor basisinformatie over de stratigrafische positie beschikbaar was (Defour et al., 1994; Indeherberge et al., 1996; Felder, 2001). Op basis van deze informatie konden het algemeen kader en de geologische betekenis goed op hun waarde worden ingeschat (Dusar & Dreesen, 2001, 2005). Een grondige studie van de aardwetenschappelijke waarde ontbrak evenwel.

2. Plattegronden

2.1. Het in kaart brengen van de grotten

Er bestaan drie generaties grotplannen voor de mergelgrotten van Vechmaal. In 1977-78 kende het KBIN[8] een nummer toe aan iedere grot en maakte Jaques Fairon (KBIN) schetsen van de plattegrond als hulpmiddel voor lokalisatie van vleermuizen in de grotten Hinnisdael I, II, III. In 1990-91 brachten de berglopers en vleermuizentellers Olefs en Dahlen alle toegankelijke grotten op plan met kompas en meetlint. Ook voor hen was het motief de lokalisatie van vleermuizenpopulaties in de grotten. Deze plannen geven gedetailleerd de vorm van de wanden op ooghoogte weer. Op deze plannen is natuurlijk de toestand weergegeven die bestond tijdens de meting. Hun plan Hinnisdael II (Champignonskuil) vermeldt bijv. dat het enkel om het zuidelijk gedeelte gaat; de oorspronkelijk bestaande verbinding met Hinnisdael I lag nog te vers in het geheugen. Zo werd de Waterkuil opgemeten wanneer de ingang nog als stortplaats fungeerde. Na opruiming van het stort werd de vrijgelegde ingangspartij schetsmatig en slechts gedeeltelijk toegevoegd aan het plan[9].

Bij de aanvang van deze studie van de Mergelkuilen werden de kaarten van Olefs & Dahlen (1990-1991) gebruikt. Deze kaarten bleken goed bruikbaar om de weg te vinden in de grotten en geven gedetailleerd de wanden van de groeves weer. De hoogtes van de gangen ontbreken echter en uit een aantal controlemetingen bleek de richting voor sommige gangen (kompasrichting) toch merkelijk te verschillen. SPEKUL (Speleologieclub van de KU Leuven) bracht Hinnisdael I (Grote Kuil) en Hinnisdael 2 (Champignonskuil) opnieuw in kaart. De detailschetsen van de wanden werden overgenomen van de kaarten van Olefs & Dahlen. Bij de nieuwe kartering van SPEKUL werd de derde dimensie toegevoegd door systematische hoogtemetingen van de galerijen.

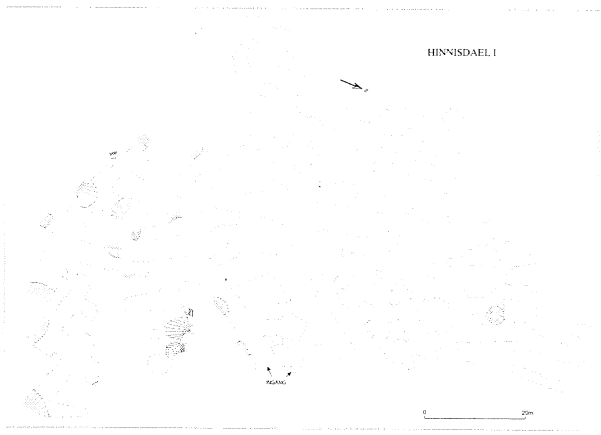
Voor het opmeten van de grotten werd de standaard techniek uit de speleologie gebruikt, met kompas, clinometer en meetlint. De meetpunten in grot werden aangebracht met een onopvallend blauw puntje nagellak op de wand. Deze punten vormen een aaneengesloten netwerk door de afstand, de azimuth (kompasrichting ten opzichte van het magnetisch noorden) en de inclinatie (hellingshoek) tussen de punten op te meten. Om de meetfout in het azimuth te minimaliseren werd steeds een "voorwaartse" (van A naar B) en "terugwaartse" meting (van B naar A) uitgevoerd. Indien het verschil tussen beide metingen meer dan 2° bedroeg werden de metingen herhaald. Hierdoor wordt een foute aflezing van het kompas uitgesloten. De hoogte van de galerij werd gemeten door middel van een LASER gestuurde afstandmeter (DISTO) in het midden van de galerij ter hoogte van het meetpunt.

Gebruikt materiaal:
Kompas: Suunto KB-14 360 RD
Clinometer: Suunto PM-5/360 PC
Verticale afstanden: LEICA DISTO LITE 5

[7] In de streek gebruikelijke benaming voor geroutineerde bezoekers van de mergelgrotten, die bijdragen tot de betere kennis ervan (kartering, veiligheid, historisch gebruik, fossielen, natuurbescherming,...).

[8] Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen, Brussel.

[9] Op de beschikbare plannen blijkt de Waterkuil ook 9% te groot t.o.v. de opgegeven lineaire schaal.



Figuur 4. Hinnisdael I: vergelijking topografische opname door SPEKUL, 2005, met die van Olefs & Dahlen, 1990 (als blauwe achtergrond).

Bij de vergelijking tussen de grotplannen van SPEKUL (SP-plan) en Olefs & Dahlen (OD-plan) werden in eerste instantie de ingangen over elkaar gelegd (Fig. 4). Globaal kan gesteld worden dat de plannen in grote mate overeenstemmen. In de zones het verste gelegen van de ingang zijn de verschillen het grootst (door een cumulatie van meetfouten). Voor het zuidelijk deel van Hinnisdael I blijkt het SP-plan een 2-tal m naar het zuiden op te schuiven in vergelijking met het OD-plan. Voor het noordelijke deel zit er duidelijk een verdraaiing tussen de plannen die voor een maximale verschuiving van 10 m zorgt voor de meest noordelijke gang. Er dient opgemerkt te worden dat één foute aflezing van het kompas verantwoordelijk kan zijn voor een belangrijke rotatie. Dit risico werd bij de SPEKUL-metingen door de gevolgde procedure (cf. supra) grotendeels uitgesloten.

Voor het zuidelijk gedeelte van de Champignonskuil is er een verschuiving van het SP-plan t.o.v. het OD-plan van maximaal 5 m naar het noorden. Het veranderend magnetisch veld (OD in 1990 en SP in 2005) kan dus niet verantwoordelijk gesteld worden voor deze tegengestelde verschillen (resp. zuidelijke en noordelijke verschuiving).

2.2. Overzicht en benaming van de grottenstelsels

De mergelgrotten zijn uiteraard al lang bekend en door de lokale gemeenschap ook benaamd. Meestal werd gewoon gesproken van de grotten van Vechmaal. Een nummering van ieder grottenstelsel (dat meerdere ingangen kan hebben die ondergronds verbonden zijn) werd ingevoerd vanaf het begin van de systematische vleermuizenobervaties door het KBIN in 1942-1943 (Tabel 1). Als vergelijkingsbasis diende het KBIN dossier 33.8/001 van J. Fairon (1977-1978) die ook verantwoordelijk was voor de KBIN nummering. De GeoDoc nummering slaat op archiefnummers voor kaartblad Borgloon 106E van de Belgische Geologische Dienst die gegeven werden aan ontsluitingen van gesteente en niet aan grotten. De depressie van de "Mergelkuilen van Hinnisdael" in zijn geheel heeft GeoDoc nummer 106E0076. 'Olefs & Dahlen, 1990-91' geven de nummers en namen weer die op hun grotplannen vermeld staan. Verschillen in nummering tussen KBIN en Olefs & Dahlen zijn ontstaan omdat grotten intussen verdwenen zijn en het grottenstelsel langs de Borgstraat in dezelfde nummering werd opgenomen die oorspronkelijk voor het gebied van de Mergelkuilen was gereserveerd, zij het in tegengestelde volgorde. Benamingen en nummering van Olefs & Dahlen (1990-1991) en/of Dewelf et al. (1978) worden in dit werk aangehouden; tussen haakjes staan de namen, vermeld in Dewelf et al., 1978 (in scheefdruk een

KBIN-1942	KBIN-1977	GeoDoc	Fairon, 1978	Olefs & Dahlen, 1990-91 (Dewelf et al., 1978)
I	I	106E0601	338/002	Henisdael I (Grote Kuil)
II	II	106E0813	338/003	Henisdael II Champignonskuil (Vossenkuil)
III	III	106E0814	338/004	Henisdael III Walenkuil
IV	IV	106E0582	338/005+6	Henisdael V (Hussenkuil[1])
V	V	106E0815	338/007	Henisdael VI
C	VII	106E0816	338/008	Henisdael VIII *(Vuilkuil)*
A-B	VII	106E0075	338/009	Henisdael VII Waterkuil (Langenakerskuil)

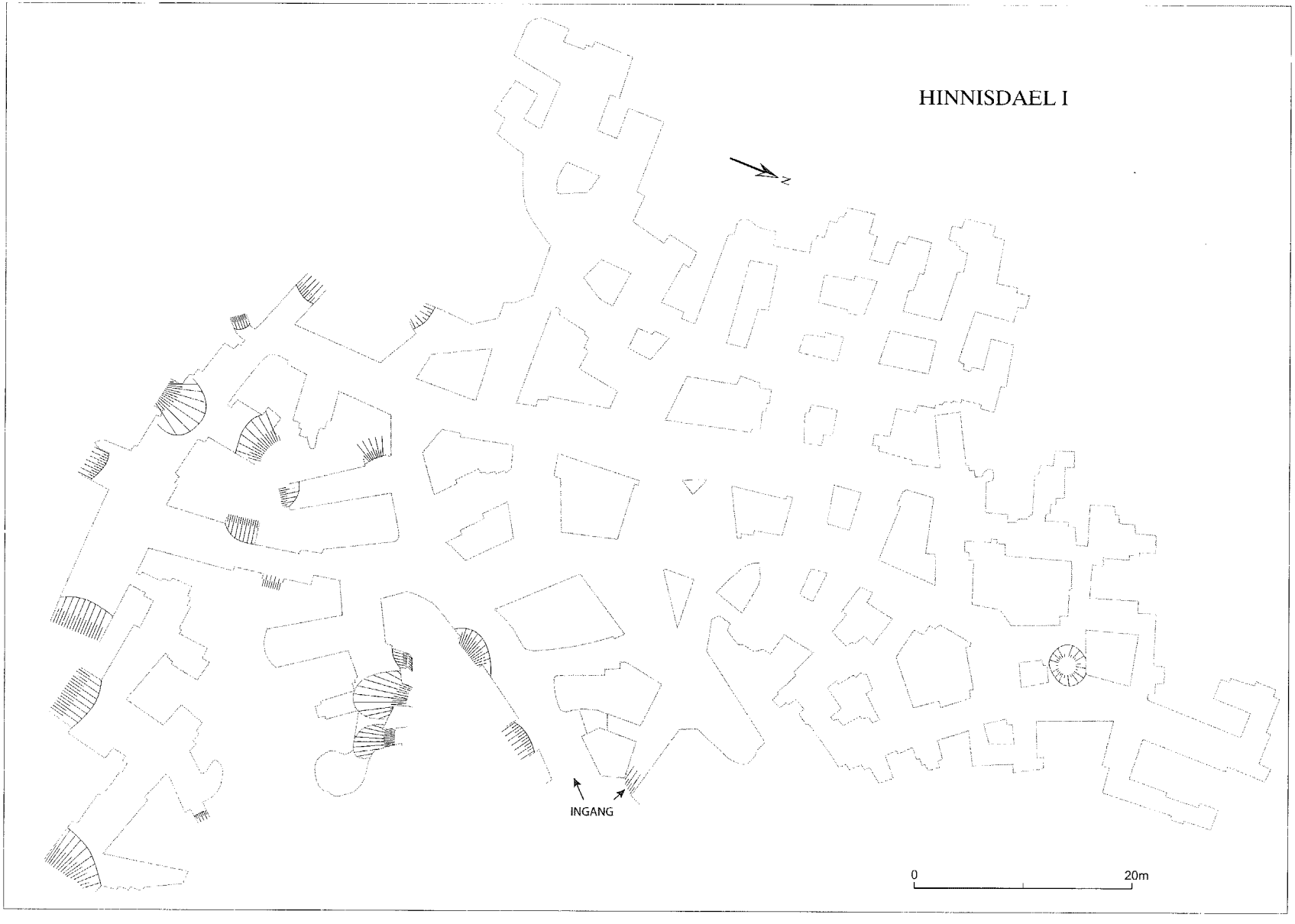
[1] Hussen: vrouwelijke alvermannekens of kabouters, ook kleine meisjes.

Tabel 1. Overzicht benamingen en nummering van de mergelgrotten te Vechmaal.

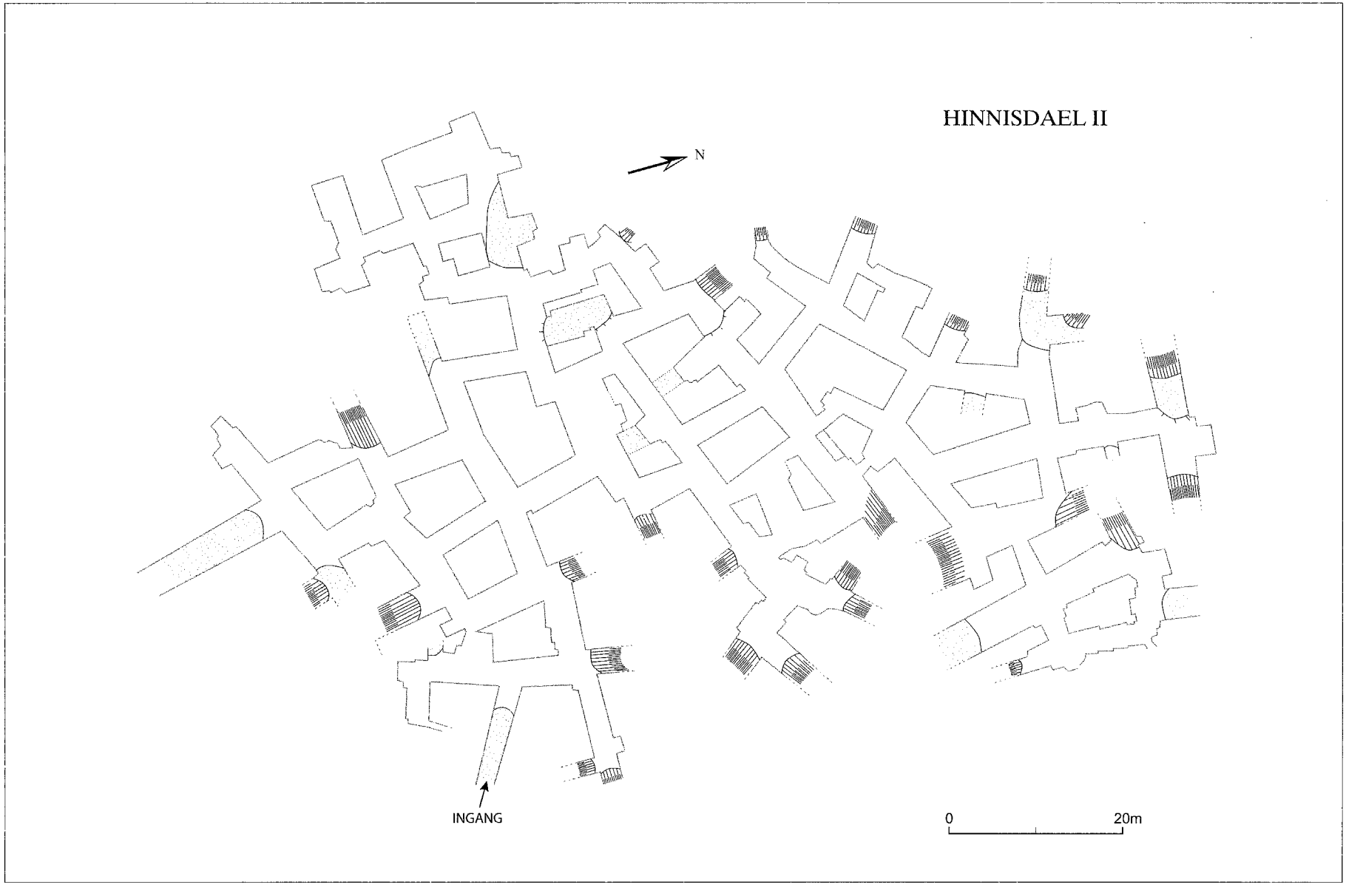
beschrijvende naam voor Hinnisdael VIII). De authentieke spelling Hinnisdael wordt gebruikt, tenzij expliciet verwezen wordt naar auteurs of documenten met Henisdael als spellingswijze. Hinnisdael IV wordt niet vermeld omdat de toegang tot de grot al lang verdwenen is.

Kort overzicht met wetenswaardigheden en soort kalksteen (zie stratigrafie):
Hinnisdael I: Nu de voornaamste grot (Grote Kuil), gebruikt als champignonkwekerij, was oorspronkelijk de uitgang van een groot grottenstelsel dat ook Hinnisdael II omvatte (Fig. 5). Hoge gangen die doorheen de Kalksteen van Nekum gaan met de Caster Hardground als dak (Fig. 6).
Hinnisdael II: Champignonkwekerij met grote ingangspoort tot 1958; ingang nadien dichtgestort en pas vrijgemaakt in de zomer van 1990 (Olefs et al., 1991). De benaming Vossenkuil slaat op de grote depressie waaronder het noordelijk deel van het grottenstelsel ingestort is. In Dahlen (1991) worden zowel Hinnisdael I en II als Champignonskuil bestempeld. In dit werk blijft de naam beperkt tot Hinnisdael II, in overeenstemming met het grotplan van Olefs & Dahlen, een gevolg van de fysische scheiding van beide stelsels door instortingen. Door de opvulling van de grot is hier enkel het hogere deel van de Kalksteen van Nekum nog zichtbaar, rondom de Horizont van Kanne. De Kalksteen van Meerssen ligt boven het erosieniveau van de top Krijt (Fig. 7).
Hinnisdael III: Ingang dichtgestort. Aan de schematische aanleg van de gangen, vergelijkbaar met een kerstboom of kruis, werd volgens de oudere dossiers een religieuze betekenis toegedicht. De afgeronde vorm van de gangen wijst op (latere) mergelwinning. Er zou een verbinding met Hinnisdael II geweest zijn die verbroken is door de instortingen onder de Vossenkuil (Dahlen, 1991)-(Fig. 8).
Hinnisdael IV: Niet meer teruggevonden maar meest waarschijnlijke plaats aangeduid volgens een schets door Fairon (1977-78). Volgens Dahlen 1991) zou Hinnisdael IV slechts een kleine afsplitsing van Hinnisdael V zijn.
Hinnisdael V: Hoge grot waarvan de ingang het meest zijn authentiek kader heeft bewaard. De meest volledige opeenvolging in de Kalksteen van Nekum is hier ontgonnen (Figs. 9-10).
Hinnisdael VI: Meerdere ingangen in steilhellende lagen met daglicht, grotendeels dichtgestort. Een oorspronkelijke verbinding met Hinnisdael V, zoals verondersteld in Dahlen 1991) is onwaarschijnlijk wegens een tussenliggende breuk (cf. infra, tektoniek). Van alle grotten rond de Mergelkuilen van Hinnisdael ligt hier de Kalksteen van Nekum het diepste, zodat enkel het interval tussen Horizont van Kanne en Hardground van Caster werd ontgonnen (Fig. 11).
Hinnisdael VII: Best toegankelijke grot en daarom enkele decennia als gemeentelijke stortplaats gebruikt. Fluctuaties van het grondwaterpeil zijn hier het best te volgen (Fig. 12).

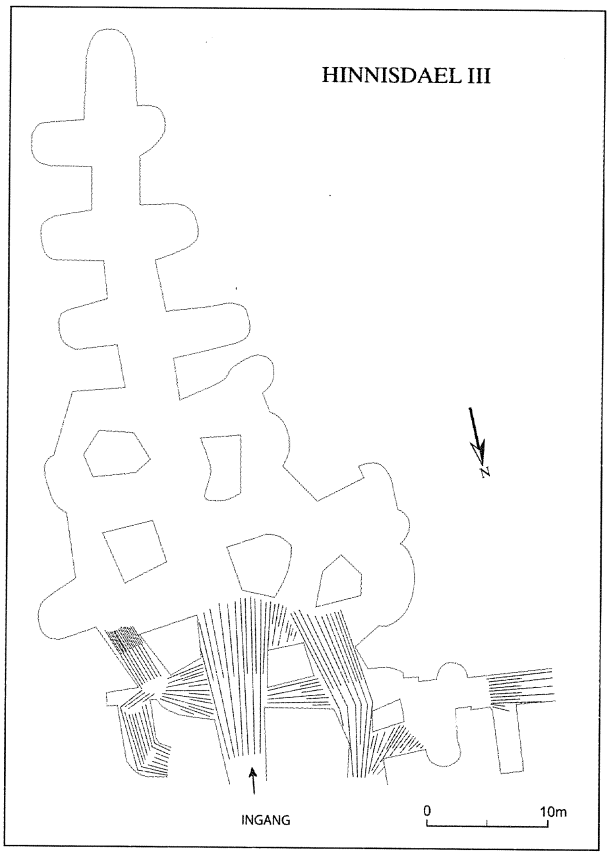
Figuur 5. Ingangsgalerij Hinnisdael I (vroegere uitgang op basis van afgravingsrichting) met paraboolvormige doorsnede onder geringe dakdikte (foto D. De Roest).



Figuur 6. Hinnisdael I of Grote Kuil, topografie door SPEKUL (2005), vorm der galerijen volgens plan Henisdael I op schaal 1/300 door Olefs & Dahlen (april-mei1990).



Figuur 7. Hinnisdael II of Champignonskuil, topografie door SPEKUL (2005), vorm der galerijen volgens plan Champignonskuil zuidelijk deel op schaal 1/200 door Olefs & Dahlen (november 1990).

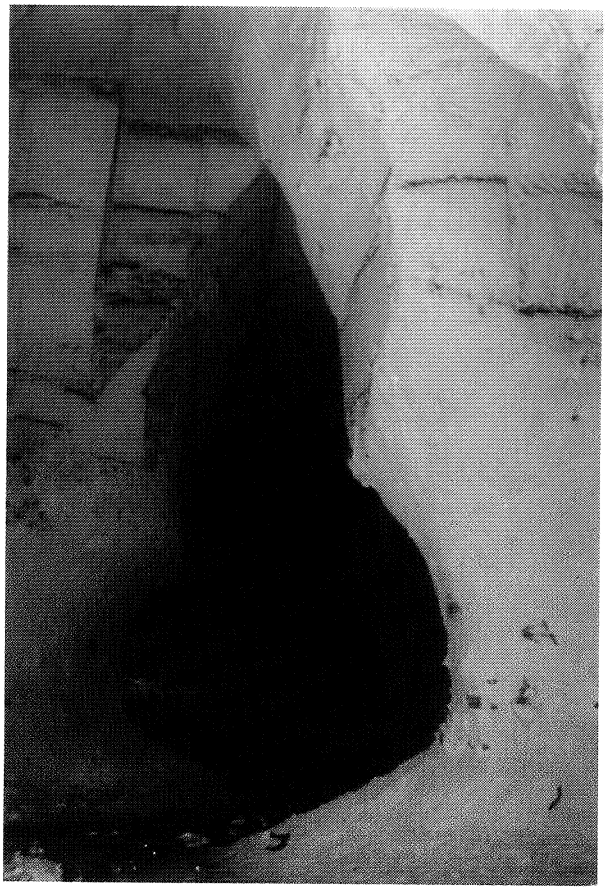


Figuur 8. Hinnisdael III of Walenkuil, topografie overgenomen van Olefs & Dahlen (januari 1991).

De schaalverdeling op de plattegrond (Olefs & Dahlen, 1990) is 9% overdreven; de hekken staan net buiten het getekende plan (Fig. 13). Exploitatie op de overgang van Kalksteen van Nekum naar Kalksteen van Meerssen; buitenwand volledig in deze laatste kalksteen.
Hinnisdael VIII: Toegang langs een diepe kuil, heropend in 1991, nadien gebruikt als illegale stortplaats voor KGA[10] en veterinair afval, tot plaatsing afsluiting met riethekken rond de toegang. Vermoedelijk in verbinding geweest met Hinnisdael VII via een nooddoorgang (Fig. 14).

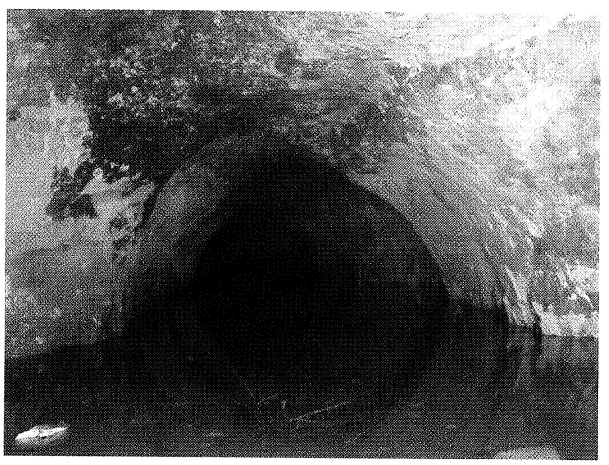
2.3. Lokalisatie van de grotingangen

Om de geografische positie van de ingangen van de verschillende mergelgrotten nauwkeurig op kaart te zetten werden GPS-metingen uitgevoerd. Ook ter ondersteuning van de hypothese van de aanwezigheid van een breuk tussen de Waterkuil (Hinnisdael VII) en het grottencomplex van de Mergelkuilen waren deze metingen van belang. Want om het bedrag van de breuk te bepalen is het relatief hoogteverschil in combinatie met een goede stratigrafische controle tussen beide locaties noodzakelijk.



Figuur 9. Hinnisdael V, hoofdgang met brede verdieping voor mergelwinning in onderste vuursteenzone; zicht in NW richting naar de uitgang (foto J. Frankie).

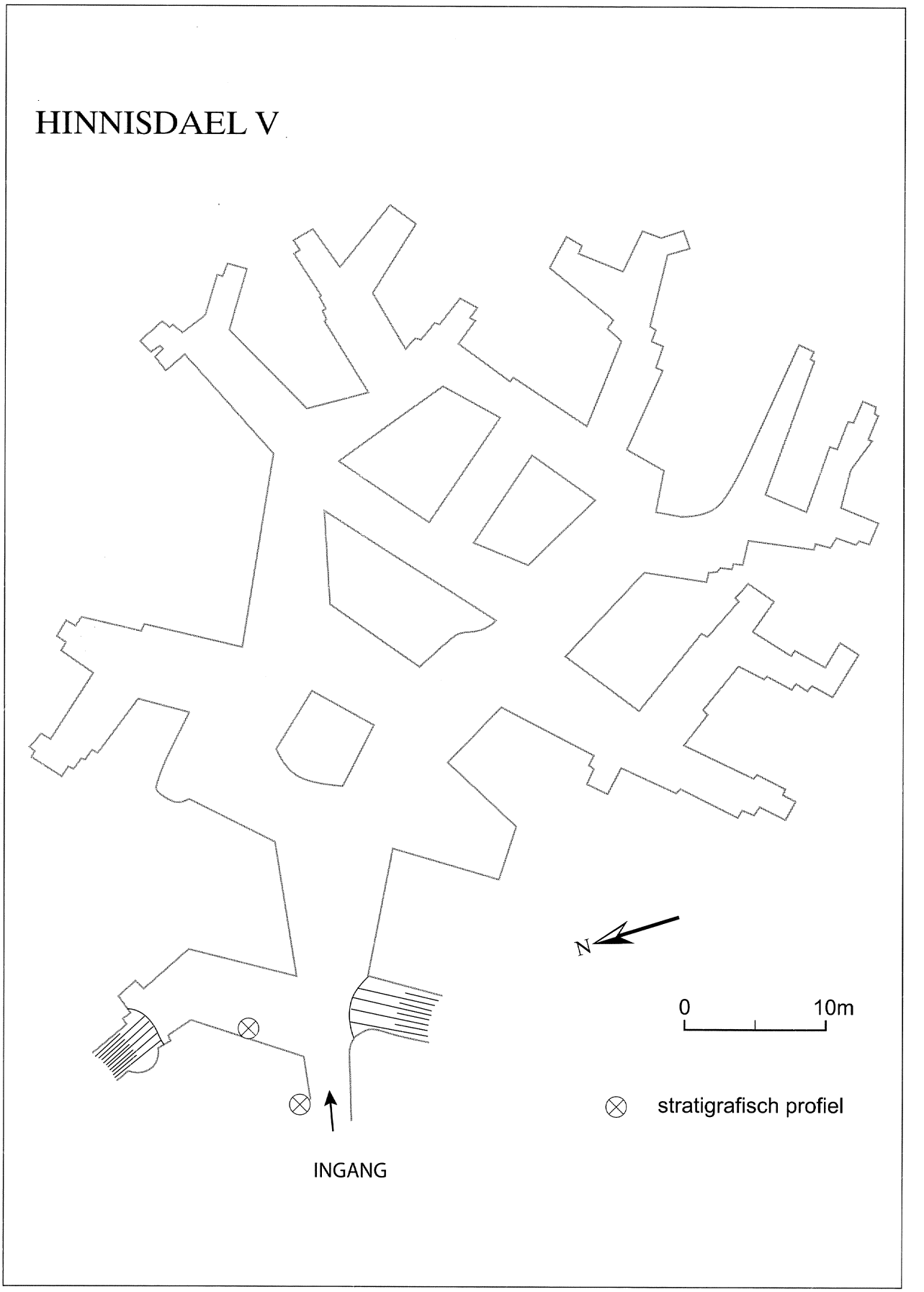
In ideale omstandigheden worden met behulp van een differentiële GPS[11] nauwkeurigheden in horizontale en in verticale zin van enkele cm gehaald. Deze omstandig-



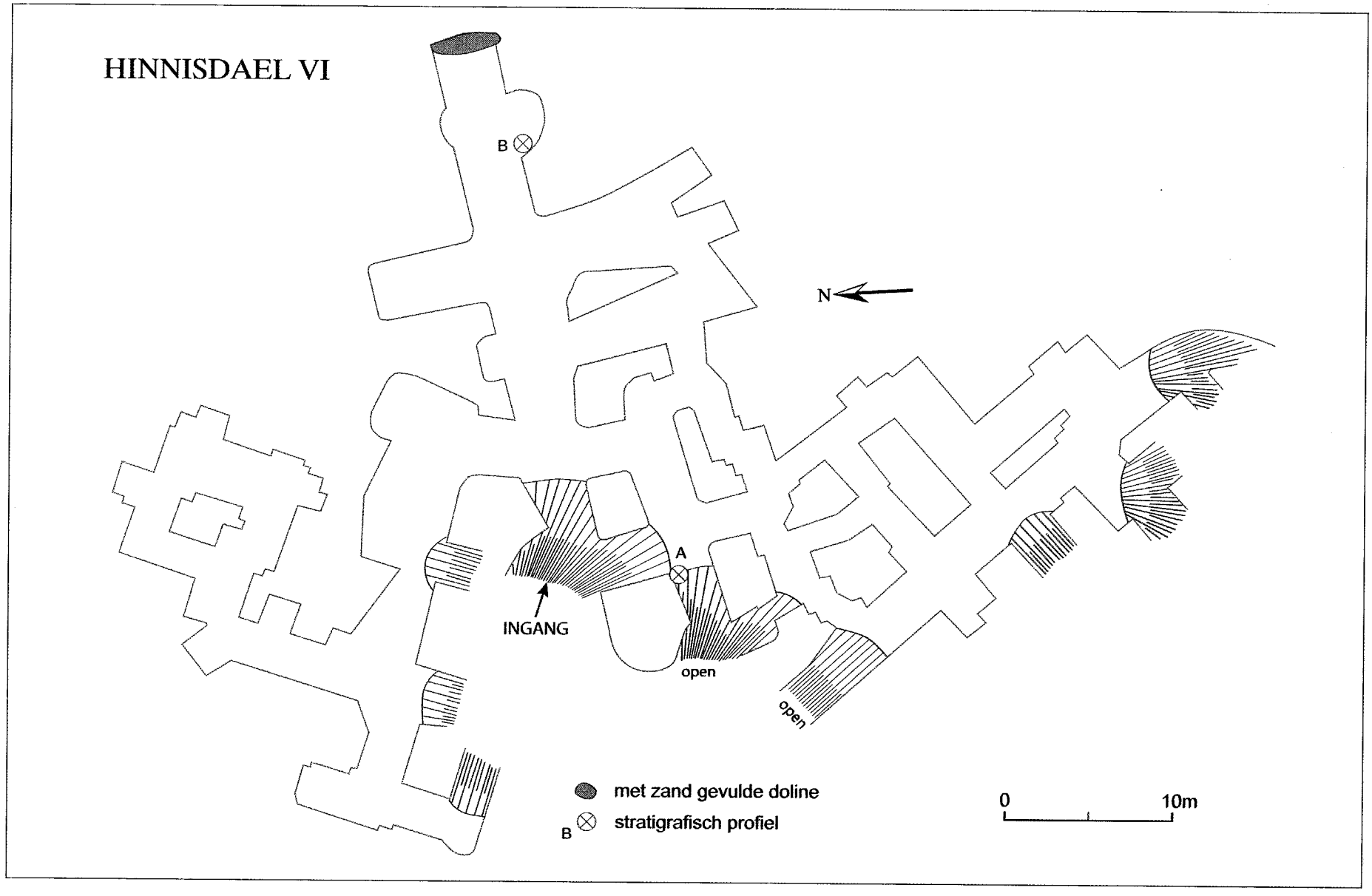
Figuur 12. Hinnisdael VII, boogvormige gang voor mergelwinning, gedeeltelijk in grondwater (foto M. Dusar).

[10] Klein Gevaarlijk Afval

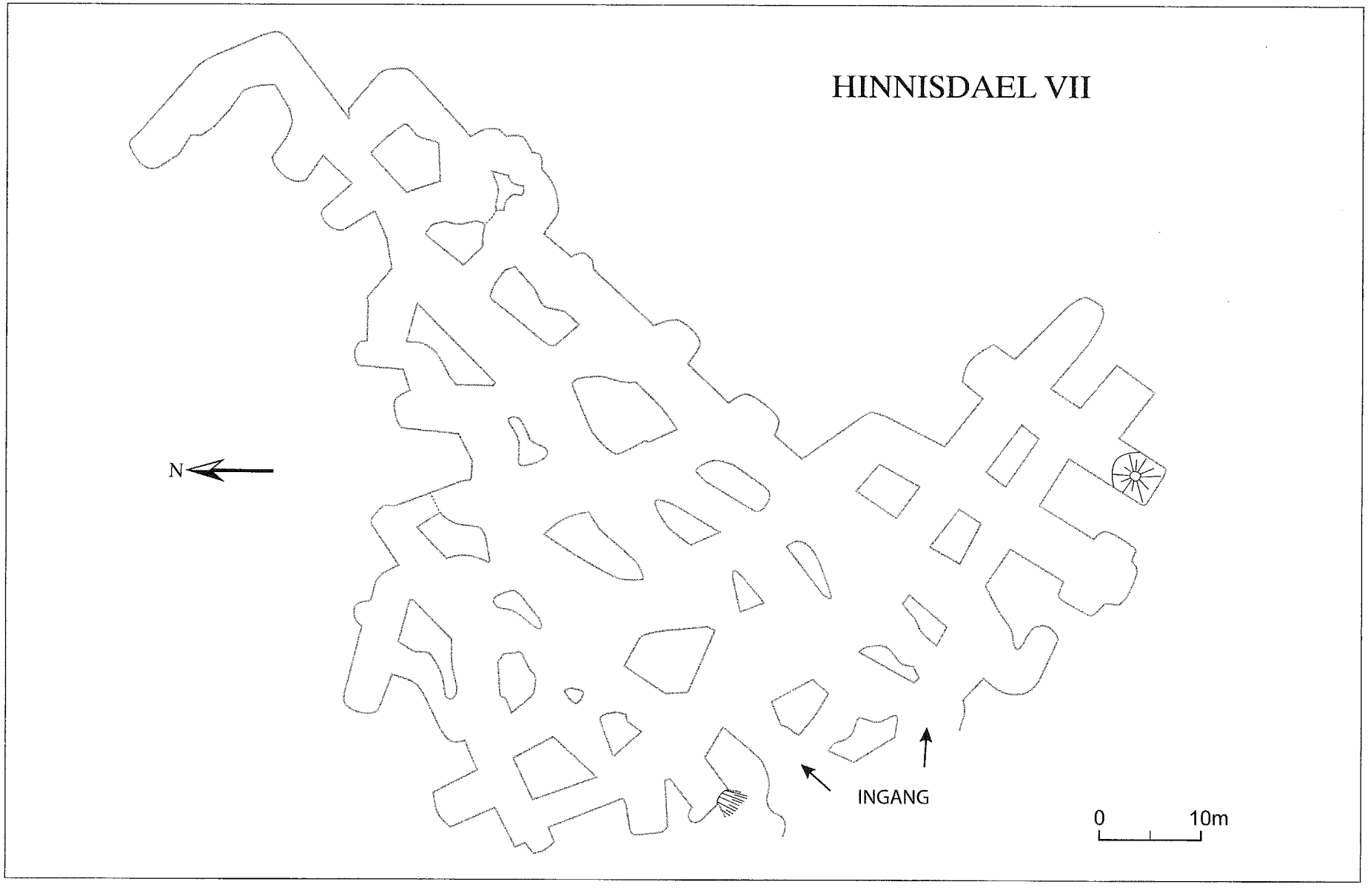
[11] Er werd gebruik gemaakt van een Leica System 500 GPS – AT Dual Frequency Antenne met Realtime Flepos-correctie.



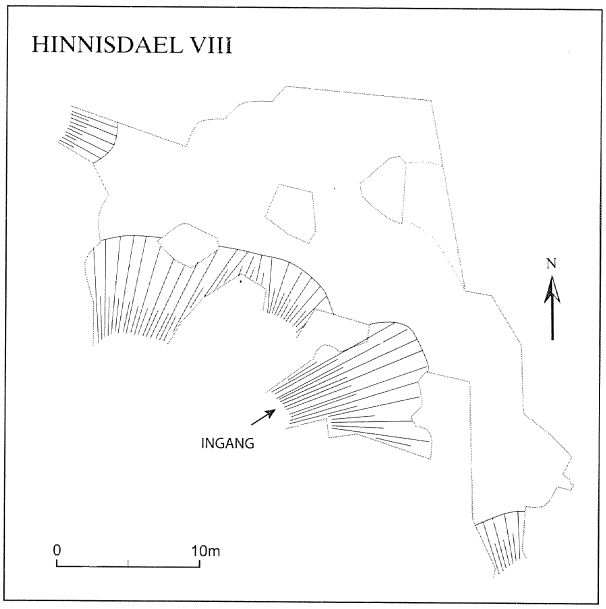
Figuur 10. Hinnisdael V of Hussenkuil, topografie overgenomen van Olefs & Dahlen (juni 1990).



Figuur 11. Hinnisdael VI, topografie overgenomen van Olefs & Dahlen (juli 1990).



Figuur 13. Hinnisdael VII of Waterkuil, topografie overgenomen van schetskaart Olefs & Dahlen (augustus 1990).



Figuur 14. Hinnisdael VIII of Vuilkuil, overgenomen van schetskaart door Olefs & Dahlen (april 1991).

heden zijn: (1) meten in een vlakke en open ruimte en (2) 'real time' correcties op de metingen op basis van een nabijgelegen referentiestation (FLEPOS-station). Aan de laatste vereiste kon worden voldaan, maar de eerste vereiste bleek de limiterende factor. Door de aanwezigheid van steilranden rond de Mergelkuilen en hoge bomen met dicht bladerdek werden minder satellieten ontvangen en nam bijgevolg de nauwkeurigheid af. Aan de ingang van de Waterkuil nam de onnauwkeurigheid in de Z-richting (verticale zin) toe tot verscheidene meters.
Om een betere GPS-nauwkeurigheid te krijgen werd afstand genomen van de steilranden en hoge bomen en een meer open omgeving opgezocht in de weide op enkele tientallen meter van de ingangen. In het studiegebied werden aldus 7 GPS-punten ingemeten. Op deze posities werden na de nodige correcties GPS-nauwkeurigheden bereikt in verticale zin van 3 cm tot 60 cm. Vanaf deze GPS-punten werd dan door middel van kompas, clino- en lintmeter (met klassieke speleotechnieken) naar de ingang getopografeerd.

Voor de lokatie van de grotingangen zijn de fouten op de GPS-metingen ruim voldoende, maar voor de breukproblematiek streefden we een grotere verticale nauwkeurigheid na, namelijk hoogteverschillen meten tot op minstens 10 cm nauwkeurig.
Hiervoor werd een tweede meetcampagne met een precisie waterpas uitgevoerd om de relatieve hoogteverschillen tussen de grotten te kennen (Tabel 2). Als startpunt voor de metingen werd GPS-punt 2 genomen, gelegen op de toegangspoort tot het weiland van de Mergelkuilen waarvan de nauwkeurigheid 2 cm bedroeg [Lambert coördinaten X 221531,12 ; Y 160810,17; hoogte 93,17 ± 0,027 m].

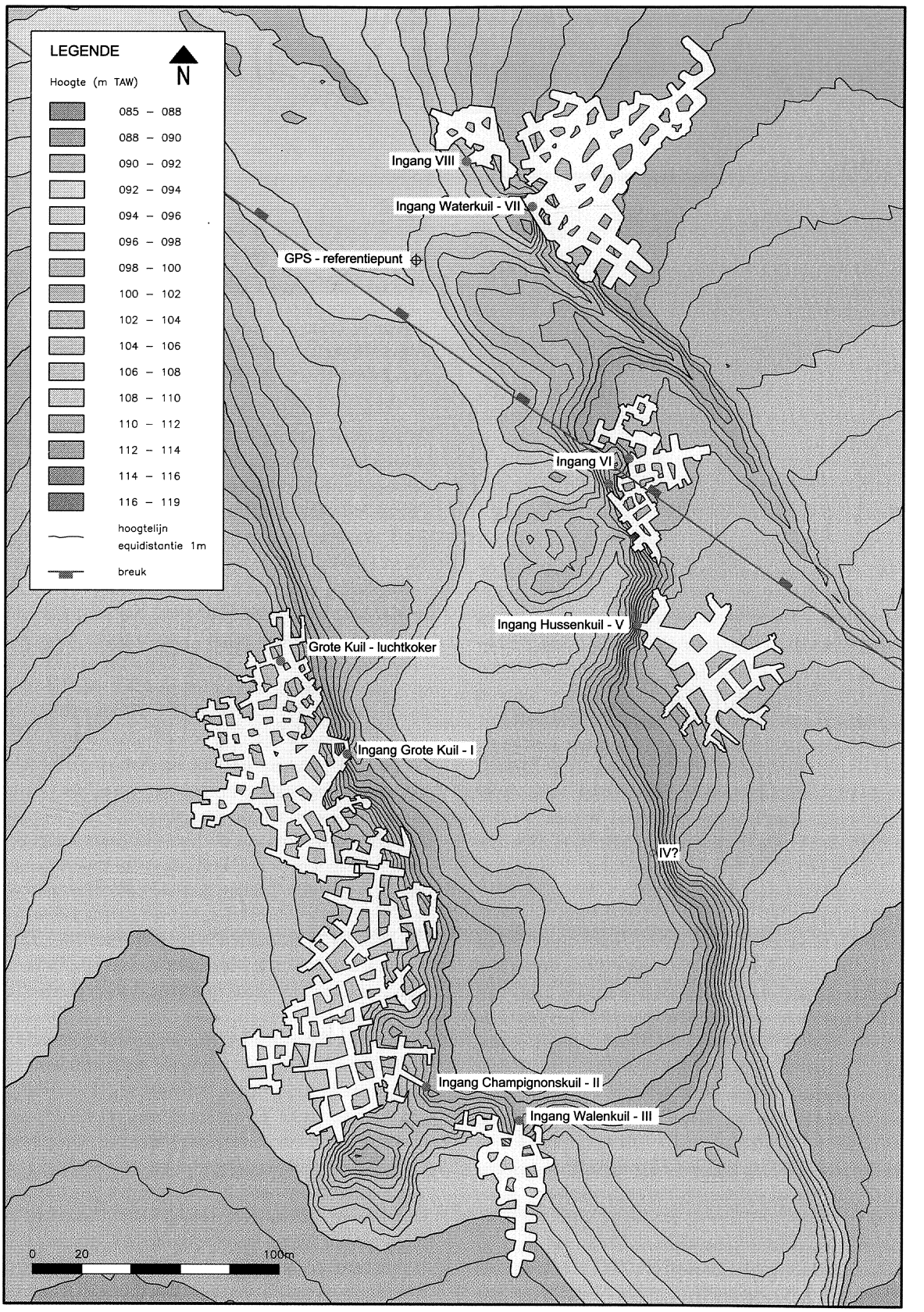
2.4. Grotplannen op de reliëfkaart

De grotplannen werden op kaart gezet om hun ruimtelijke verbreiding beter te kunnen inschatten en de relaties met oppervlaktetopografie en landgebruik na te gaan. De topografische kaart bleek minder nauwkeurig en gedetailleerd dan het nieuwe Digitaal Hoogte Model Vlaanderen (meetpunt om de 5 m)[12]. De plannen van de Grote Kuil (Hinnisdael I) en de Champignonskuil (Hinnisdael II) zijn het resultaat van de SPEKUL-metingen. De overige plannen werden gedigitaliseerd van de Olefs & Dahlen topo's. De positie van alle grotten werd nauwkeurig ingemeten, enkel de positie van de opgevulde grot IV blijft twijfelachtig. Ook het GPS meetpunt dat als vertrekpunt voor de waterpasmeting en de hoogtebepalingen diende is aangeduid (Fig. 15).
Hinnisdael I en II vormden duidelijk één systeem. In onze opmeting zou de afstand tussen beide grotten zeer klein zijn (de kleine overlapping is het resultaat van gecumuleerde meetfouten op de verste punten van de ingang). Hinnisdael I werd gepositioneerd door een GPS-punt te nemen boven de luchtkoker omdat de meetfout hier kleiner was dan aan de ingang (steilrand en hoge bomen).

Ingang	**Beschrijving**	**X**	**Y**	**Hoogte** (m TAW)
Hinnisdael I	linkerbovenhoek deur in hek	221512,51	160607,82	96,25
Hinnisdael II	dak ingang grot	221535,99	160475,57	99,27
Hinnisdael III	depressie boven opgevulde ingang	221573,69	160462,10	100,35
Hinnisdael V	fossielgruislaag (Kanne Horizont)	221620,96	160662,94	94,96
Hinnisdael VI	dak noordelijke ingang	221609,37	160719,71	94,47
Hinnisdael VII	slot in noordelijk hek	221578,18	160831,84	91,5
Hinnisdael VIII	hoogste punt ingang	221551,35	160850,33	93,74

Tabel 2. Lambert coördinaten en hoogtes van de ingangen van de mergelgrotten bepaald uit GPS-punt en nivellering.

[12] http://geo-vlaanderen.gisvlaanderen.be/geo-vlaanderen/dhm/



Figuur 15. Digitaal Hoogte Model van de Mergelkuilen van Hinnisdael in planzicht, noorden naar boven georiënteerd (bron GIS-Vlaanderen), met aanduiding der grotingangen, GPS referentiepunt en gepostuleerde breuk (rode lijn met blokjes aan de afgezakte kant; zie hoofdstuk tektoniek). Localisatie Hinnisdael IV is hypothetisch. Gedigitaliseerde grotplannen (Hinnisdael I en II volgens SPEKUL meting; de andere grotten volgens Olefs & Dahlen, 1990-91). De goede aansluiting tussen Hinnisdael I en II toont aan dat de verbinding tussen beide grotten door twee instortingen van beperkte omvang verbroken is.

Het zuidelijke punt van de Champignonskuil wordt begrensd door de instortingsdoline van de Vossenkuil. Dit is ook de plaats waar momenteel de grootste instroom van modder plaatsvindt.

3. Historisch overzicht

3.1. Wanneer werden de mergelgrotten gedolven ?

Mergelwinning voor bodemverbetering werd reeds door de Oude Belgen toegepast, zoals Plinius de Jongere beschrijft in zijn 'Naturalis Historiae' en de Gallo-Romeinen gebruikten Maastrichtersteen als bouwsteen, zoals blijkt uit archeologische opgravingen in de regio Tongeren – Maastricht. Toch zijn er nergens bewijzen gevonden dat de mergelgrotten een voor-middeleeuwse oorsprong zouden hebben.

Alhoewel Vechmaal steevast ontbreekt in de gepubliceerde overzichten van de Belgisch- en Nederlands-Limburgse mergelgrotten of alleszins niet meer dan een voetnoot waard is, zijn er toch oude historische bronnen, geïnventariseerd door Duchateau (1959). De oudste schriftelijke vermelding van de mergelgrotten van Hinnisdael dateert van 1303: "sous la fosse de henisdal" (Rijksarchief Luik, Fonds Pauvres et Isle Nr. 14, Désignation des biens et revenus A1303). Vervolgens in 1473 : «die cule tot henisdaill» (Rijksarchief Hasselt, Algemeen Chartarium). Uit de 17de-18de eeuw dateren de meeste verwijzingen, meestal uit het Rijksarchief Hasselt [1630, 1642, 1662, 1665, 1677, 1678, 1680, 1682, 1684 (alle vermelden "hinnisdaelse caulen" of "cuylen"), 1685, 1712, 1715, 1717 (alle "hi(j)nsdaels cuylen"), 1729, 1730, 1750, 1770, 1773, 1774 (zowel he(n)nisdael, hensdael of hijnsdaels als hinnisdaels cuijlen), 1792, 1793, 1828, 1859 ("henisdael kuijlen")].
Hinnisdael was een riddergoed, dat zijn naam geschonken heeft aan de mergelgrotten die onder dit goed vielen. Het oudste kasteel van Hinnisdael werd op basis van archiefstukken daterend van 1260 tot 1321 op dezelfde plaats gesitueerd (Rijksarchief Luik, Fonds Pauvres et Isle, Désignation des biens et revenus Nrs. 11-13-17; Fonds Abbaye du Val des Ecoliers Nr. 2 en Fonds Chapitre Saint-Martin Registres Nr. 10). Deze burcht zou reeds eind 14de eeuw vervallen zijn, in een periode van grootschalige verwoestingen tijdens de burgeroorlog in het Prinsbisdom Luik. In 1682 stond er "die Motte", een winning "super quo ante hac fuit castellum de henisdael" (1684)-(Rijksarchief Hasselt, Fonds Schepenbank Vechmaal Nr. 3 en Fonds Leenzaal Kuringen, Bundel Nr. 77). De veldweg die nu toegang tot de Mergelkuilen van Hinnisdael verschaft heet trouwens de Borgstraat of de Burchtstraat.

Figuur 16. Onderste, vermoedelijk oudere geleding van de 17de eeuwse slottoren en waterboog bij Kasteel en Hof van Henisdael, gebouwd in lokale Maastrichtersteen (foto M. Dusar).

Alhoewel de plaatselijke overlevering op basis van bovenvermelde archiefstukken als onomstotelijk aanvaardt dat de oorspronkelijke "borg" van Hinnisdael in de depressie van de Mergelkuilen stond (Dewelf et al., 1978, p. 107-110), zijn hiervoor geen materiële bewijzen gevonden. De plaatsbepaling in oude archiefstukken, wanneer al voorhanden, is vatbaar voor interpretatie: bijv. "op de berg tussen het dorp en de Romeinse Kassei, in de richting van Lauw of Wouteringen". Daarentegen is het huidige kasteelsite, bekend als "Kasteel en Hof van Henisdael", ontstaan als leengoed van het geslacht der Hinnisdaels, en daterend uit de 17de eeuw (Fig. 16; afbeelding in Dullaers, 2004: maand juni), gebouwd op oudere grondvesten en gunstig gelegen vlak bij de Asborn[13]. Er zijn dus twee mogelijke sites voor de oorspronkelijke burcht van Hinnisdael, waarvan de ene, gelegen in de "Bergkuilen" de voorkeur geniet van de historici maar waarvan geen materiële sporen (meer) bestaan, en de andere gelegen op het lager gelegen huidige Kasteel op 650 m afstand van de Mergelkuilen de voorkeur geniet van de bouwhistorici (mondelinge informatie Philippe Adriaensen). Er is hoe dan ook iets loos in de Mergelkuilen van Hinnisdael, zoals hun onnatuurlijke vorm spontaan doet veronderstellen.

Hiermee bezitten de mergelgrotten van Vechmaal wel een vergelijkbare anciënniteit met de weliswaar veel grotere en meer bekende grotten onder de Sint-Pietersberg, tussen Maastricht en Ternaaien. Silvertant (2003) haalt de eerste schriftelijke vermelding aan van mergelwinning als bodemverbeteraar, nog niet als bouwsteen, in het jaar 1213, en vermoedt dat de ondergrondse exploitatie door kennisoverdracht na de kruistochten is tot stand gekomen. Hij vermeldt tevens dat de bouwsteenproductie een hoogtepunt bereikte omstreeks 1500. Historische aanwijzingen worden overigens bevestigd door bouwsteengebruik in historische monumenten.

[13] De Asborn is de hoogst gelegen permanente bron in het breedglooiende dal dat naar de Mergelkuilen van Hinnisdael leidt. De Mergelkuilen van Hinnisdael vertonen geen georganiseerd draineringspatroon of oppervlaktewater; de enige toegang tot grondwater is langs de grotten.

Figuur 17. Borgstraat met ingang Waterkuil en passerende scheper. Nels Bruxelles: Vechmael – De Grotten (fotografische reproductie, collectie A. Dewelf).

Volgens Dahlen (1991, overgenomen in Dahlen,1992 en Indeherberge et al., 1996) dateren de oudste inscripties op de grotwanden in Vechmaal uit de 16de eeuw. Vander Maelen (1835, p. 137) vermeldt nog mergelwinningen, weliswaar niet meer van industriële betekenis, in acht kuilen (of ondergrondse groeves). In de archieven van de Belgische Geologische Dienst vermeldt Van den Broeck in 1883 een zekere Van de Steen als eigenaar van drie grotten waaronder de Waterkuil (Fig. 17). In de Patrijnenkuil[14] eveneens te Vechmaal (GeoDoc archiefnummer 106E0110) vermeldt hij een deels opgevulde gang, gedolven in tufkrijt met de kenmerken van de Kalksteen van Nekum[15], dus vermoedelijk ook voor bouwsteen ontgonnen. Te Horpmaal vermeldt hij enkel nog sporen van ontginning: de grotten waren er reeds niet meer toegankelijk.

Er is zeker geen relatie tussen ontginningstechniek en tijdstip van exploitatie. Het is rond de Mergelkuilen duidelijk dat grootschalige bouwsteenproductie voorafging aan mergelwinning[16], alhoewel kleinschalige bouwsteenproductie tot in de 19de eeuw doorging. De verdieping van de groeves tot in de lagen met silexknollen was namelijk pas mogelijk nadat de bovenste reguliere sectie was afgegraven. Rechtgezaagde wanden werden dus weggebroken en verdiept voor de mergelwinning. Veel pilaren werden hierbij aan de voet uitgehold, zodat er duidelijk sprake is van roofbouw, waardoor soms bijzonder kwetsbare toestanden en instortingsrisico's ontstonden. Het is duidelijk dat mergelwinning profiteerde van het kader dat door bouwsteenexploitatie was geschapen. Alleen werd de stielkennis die bij het zagen van de mergelblokken onmiskenbaar aanwezig was niet meer gerespecteerd. Mergelwinning

[14] In de betekenis van 'poterijne cuijlen' (van pottenbakkerij). Opmerkelijk is dat deze naam pas opduikt in 1788. Voordien was dit site bekend als Truyerkuylen, naar Sinte Geertrui die vereerd werd te Vechmaal, of Ketel, naar de uitgeholde vorm van de depressie (Duchateau. 1959). Dit lijkt erop te wijzen dat reeds in 1788 de mergelgrotten aldaar verlaten waren en geen nuttige functie meer bezaten. Op de stafkaart is de naam Patrijnenkuil verminkt tot Patrijzenkuil. Uiteraard wordt deze foutieve weergave hier niet gevolgd.

[15] Zie hoofdstuk stratigrafie.

[16] Mergelwinning sensu stricto is de exploitatie van mergel als bodemverbeteraar, gezien in tegenstelling met de exploitatie van mergelsteen of Maastrichtersteen als bouwsteen.

werd enkel in het systeem van de Waterkuil exclusief toegepast omdat aldaar geologische omstandigheden tot deze beslissing dwongen.

De geschiedenis van de mergelwinning in Vechmaal vertoont nog veel lacunes. Archeologisch en bodemkundig onderzoek kunnen mogelijk een verklaring bieden voor de onnatuurlijk rechthoekige vorm van de 'Mergelkuilen van Hinnisdael' en daarmee samenhangend voor de mergelgrotten die uitgeven op deze depressie.

3.2. Later gebruik

Eenmaal uitgegraven is het gebruik van de Vechmaalse grotten beperkt gebleven (zie Dewelf et al., 1978, p. 398-399 voor een vermakelijk overzicht). Het werd een speelterrein of 'vrijersplekje' voor de jeugd. Er werden gevechten in regel gehouden tussen de dorpsjeugd en de "Walen" uit het naburige Wouteringen en Oreye[17]. Eind 19de en begin 20ste eeuw waren de "grottes de Fimal" een opwindende toeristische attractie voor bezoekers die voornamelijk uit het Luikse kwamen (Fig. 18). Bezoekers waagden zich niet diep in de grotten of werden afgeschrikt door het water, zodat fantastische veronderstellingen werden gemaakt over de lengte van de gangenstelsels die volgens lokale mythes tot Tongeren zouden doorlopen en reeds door de Romeinen waren uitgegraven (Anciaux, 1950, p. 304; de Loë, 1902)[18]. Soms wordt verwarrende informatie over de ontstaansgeschiedenis verspreid (Diriken, 1985, p. 16[19]). De geweldige overdrijvingen over ouderdom of lengte van de grotten tonen aan dat de schrijvers de grotten niet grondig verkend hebben en mogelijk niet verder gegaan zijn dan het daglicht toeliet. Fluctuerende grondwaterstanden in Hinnisdael V, VI, VII en VIII of aanslibbing in Hinnisdael II bieden niet alleen bescherming tegen bezoekersstromen; het zijn ook kenmerken die in de grotten van het Mergelland uitzonderlijk voorkomen.

De 20ste eeuw zag een erg wisselend 'gebruik' van de mergelgrotten. Tijdens de eerste wereldoorlog vestigde

Figuur 18. Ingang Hussenkuil, 22.8.1906, uit de reeks Nels Bruxelles Série 35 N° 6, "Les Environs de Waremme. Entrée de la Grotte de Hinisdael" (fotografische reproductie, collectie A. Dewelf).

de Duitse bezetter zich in Hinnisdael I. Omwille van de constante temperatuur en vochtigheidsgraad en de duisternis werden de mergelgrotten geschikt bevonden voor de kweek van paddestoelen, die pas in de 20ste eeuw op punt werd gesteld. Tussen de 30er en de 50er jaren van de 20ste eeuw werden Hinnisdael I en II en ook de Waterkuil gedeeltelijk en met wisselend succes voor champignonteelt ingericht. Teelttechnieken en bemesting stonden nog niet helemaal op punt zodat geregeld misoogsten voorkwamen (persoonlijke mededeling Julien Jorssen). Met teer beklede waterbakken, lage dammen tegen modderstromen en nagelrijen als restant van afsluitingen

[17] Bij deze gevechten kwam het er op aan de tegenstrever 'in het zand te doen bijten'. Het mulle zand in de grotten ontstaat door desintegratie van het tufkrijt, dat gemakkelijk in losse kalkkorrels uit elkaar valt. De petrografische benaming voor deze zwak gebonden kalksteen is kalkareniet, t.t.z. kalksteen met een zandtextuur, een naam afgeleid van het Latijnse 'arena' waarvan de bodem met zand werd bestrooid.

[18] In dezelfde zin kunnen we verder gaan : " Vechmael possède une attraction digne d'intéresser le touriste; nous voulons parler des grottes dites de Hénisdael, creusés sous l'emplacement même de l'ancien château. Une arcade haute de cinq mètres, taillée dans la pierre de sable [oude Franstalige benaming voor Maastrichtersteen, met dezelfde waarde als het Nederlandstalige mergelsteen], y donne accès, et elles renferment dit-on, des salles spacieuses et de vastes couloirs souterrains, qui suivant la légende de la contrée auraient été creusées du temps de la domination romaine, et se prolongeraient jusqu'à Tongres. » (L'ancien Pays de Looz. Tablettes mensuelles illustrées concernant l'histoire et l'archéologie du Limbourg, t. 3, nr. 6, 1899).

[19] Stop 2: "Vechmaal, drinkwater uit krijt" vermeldt dat mergel van Tertiaire ouderdom in de grotten te zien is. Deze lapsus is mogelijk te wijten aan verwarring tussen de Tertiaire 'Mergel van Gelinden' en het Maastrichts tufkrijt dat lokaal ook mergel wordt genoemd. Verder in de tekst wordt wel een correcte Krijtouderdom voor de mergelgrotten vermeld. Op dezelfde plaats staat ook dat grotten ontstaan door insijpeling van zuur regenwater, uiteraard correct voor natuurlijke grotten maar irrelevant in deze context waar over kunstmatig gedolven ondergrondse groeves wordt gesproken.

in zeildoek of plastiek herinneren daar nog aan, evenals afgeschuinde pilaren waar in- en uitgaande karren een bocht maakten. De verluchtingskokers voor Hinnisdael I, de Champignonskuil (momenteel volgestort) en de Waterkuil zijn toen ook aangelegd. Aan de champignonteelt kwam een abrupt einde op 23.12.1958 met de ramp in de Roosburg te Zichen-Zussen-Bolder.

Het ingangsportaal van de Waterkuil (Hinnisdael VII) fungeerde een tijdlang als gemeentelijke stortplaats – "wegens gevaar voor instortingen" (Dullaers, 1982: maand maart) - maar dit afval werd na 1990 geruimd in het kader van de ruilverkaveling Horpmaal. Op kleinere schaal werden de grotten nog gebruikt voor dumping van klein gevaarlijk afval en er komt nog steeds zwerfvuil terecht, maar ook deze problemen zijn oplosbaar. Hinnisdael I en de Waterkuil bij lage waterstand werden misbruikt als kampplaats en zelfs als oord voor motorcross (een motor is gedumpt achteraan in de Waterkuil waar het waterpeil nu 1,5 m bedraagt). Bij hoge waterstand kan de Waterkuil zelfs met kano's bevaren worden (Dusar, 1969). De Waterkuil ligt langs een wandelroute en de gidsen maken graag een halte in de grot tot aan de rand van het water. De andere grotten liggen op privé domein, buiten het toeristisch circuit en dit kan uit veiligheidsoverwegingen en ter bescherming van de natuurlijke biotoop van de vleermuizen best zo blijven.

De Vechmaalse grotten bieden ook mogelijkheden tot natuurwetenschappelijk onderzoek. Ze zijn rijk aan fossielen en werden dan ook door fossielenverzamelaars en specialisten van de Krijtstratigrafie bezocht en bemonsterd (Defour et al., 1994; Indeherberge et al., 1996; Felder, 2001). De grotten vormen op de eerste plaats een geschikt overwinteringsbiotoop voor vleermuizen. Het eigenlijke grotonderzoek was echter het werk van de Vleermuizenwerkgroep. Sinds 1942 worden systematische tellingen uitgevoerd, aanvankelijk door het KBIN (Dahlen, 1992). In 1977-78 leidde J. Fairon (KBIN) een grondiger onderzoek en maakte schetsen van Henisdael I, II, III. Na de gewestvorming van 1988-89 werden de metingen overgenomen door het Vlaams Gewest (coördinator A. Lefevre, met tellers P. Olefs en J. Dahlen, opgevolgd door B. Odeur en J. Willems, bijgestaan door J. Geuten). Ook de deskundige inbreng van de Studiegroep Ondergrondse Kalksteengroeven (SOK), in het bijzonder T. Breuls en F.S. van Westreenen, is van groot belang geweest voor de uiteindelijke erkenning van de natuurhistorische waarde van de grotten en de landschappelijke bescherming.

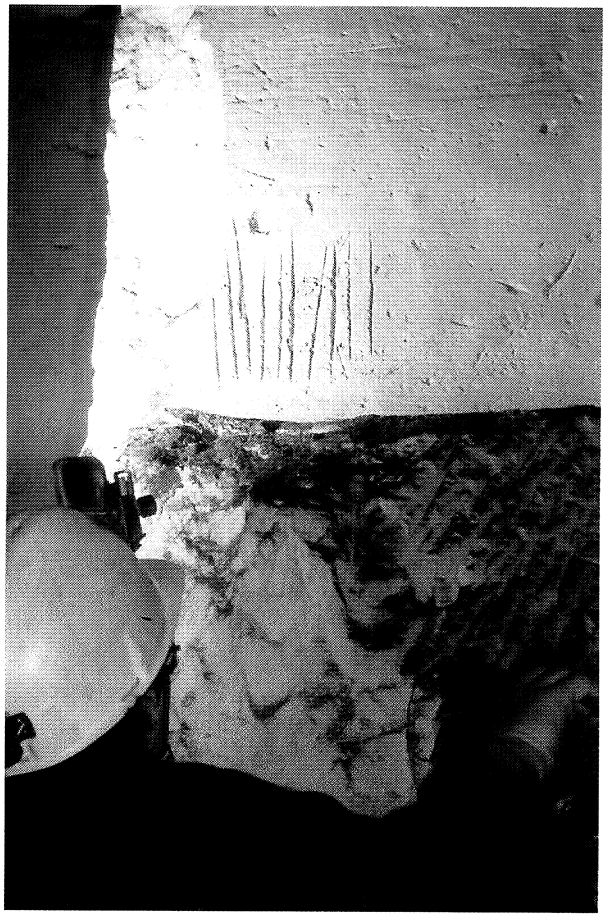
4. Ontstaan van de mergelgrotten

4.1. Exploitatietechniek

De winning van de kalksteen kon op twee wijzen gebeuren: met houweel of 'pik' wanneer enkel gruis voor kalkbemesting of silex als ruwbehouwen bouwsteen geproduceerd moest worden, of met een stel gereedschappen zoals zaag, beitel en houweel, wanneer 'blokken gebroken' werden voor de productie van Maastrichtersteen. Deze steen is immers zo zacht door de beperkte cementatie en de hieruit voortspruitende hoge porositeit en zo weinig abrasief (calciet heeft een hardheid 3 op de schaal van Mohs) dat hij gemakkelijker dan hout gezaagd kan worden. Werken met houweel voor mergelwinning liet waaiervormige sporen na op de wanden en eveneens boogvormige doorsneden van de gangen. Werken met de blokkenzaag, een grofgetande, zware zaag met zaagsnede van ca 80 cm lengte, waarvan ook een kleinere versie, de opzetzaag bestond, liet rechte wanden na waarin de vorm van de blokken goed herkenbaar is (Fig. 19). Blokbrekers gebruikten ook houwelen, die waaiervormige slagsporen nalieten, en stootbeitels (of handbomen), die korte rechte steeksporen nalieten (ca 5 cm breed en 20 cm lang). Bouwsteenproductie was het werk van blokbrekers. Dit waren dorpelingen die het blokbreken combineerden met de boerenstiel. Blokbreken in mergelgrotten werd nooit als een ambacht beschouwd, in tegenstelling met het steenhouwen in andere gebieden, al blijkt uit de werkwijze der blokbrekers overduidelijk een gedegen kennis van de steeneigenschappen, wat wij tegenwoordig de geologische kenmerken zouden noemen, en een efficiënte exploitatie tot de maximaal haalbare productie van bouwstenen uit de beschikbare afzetting, af te leiden uit de grotplannen.

De exploitatietechniek heeft sporen achtergelaten op de grotwanden (Fig. 20). Hieruit kan worden afgeleid dat de exploitatietechniek vergelijkbaar was met het typegebied rond Maastricht, zoals beschreven op basis van de laatste commerciële blokbrekers aan het werk te Sibbe bij Valkenburg en Zichen-Zussen-Bolder door van Wijngaarden (1967); Kleynen & Hillegers (1976); Breuls (1985, 1994); Jongen (1988, samengevat in Gyselinck, 1989); Dahlen (1991) – (Fig. 21).

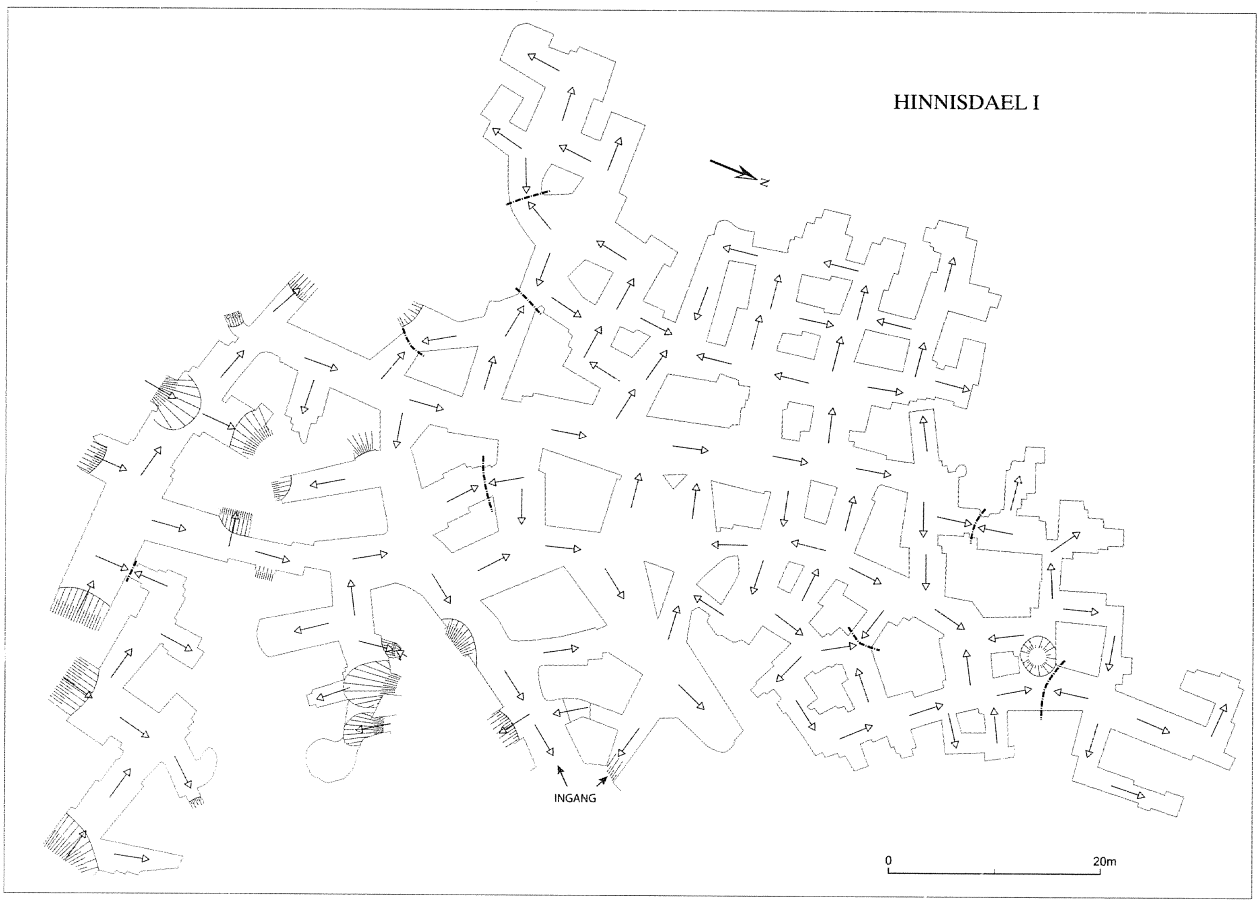
Figuur 19. Hinnisdael I, noord-zuid gerichte hoofdgalerij "Rue de Paris", met detail van rechte zijwand met overdaad van recente inscripties, afgestoken onder de vuursteenlaag, vlak onder de Horizont van Kanne gelegen (foto J. Frankie).

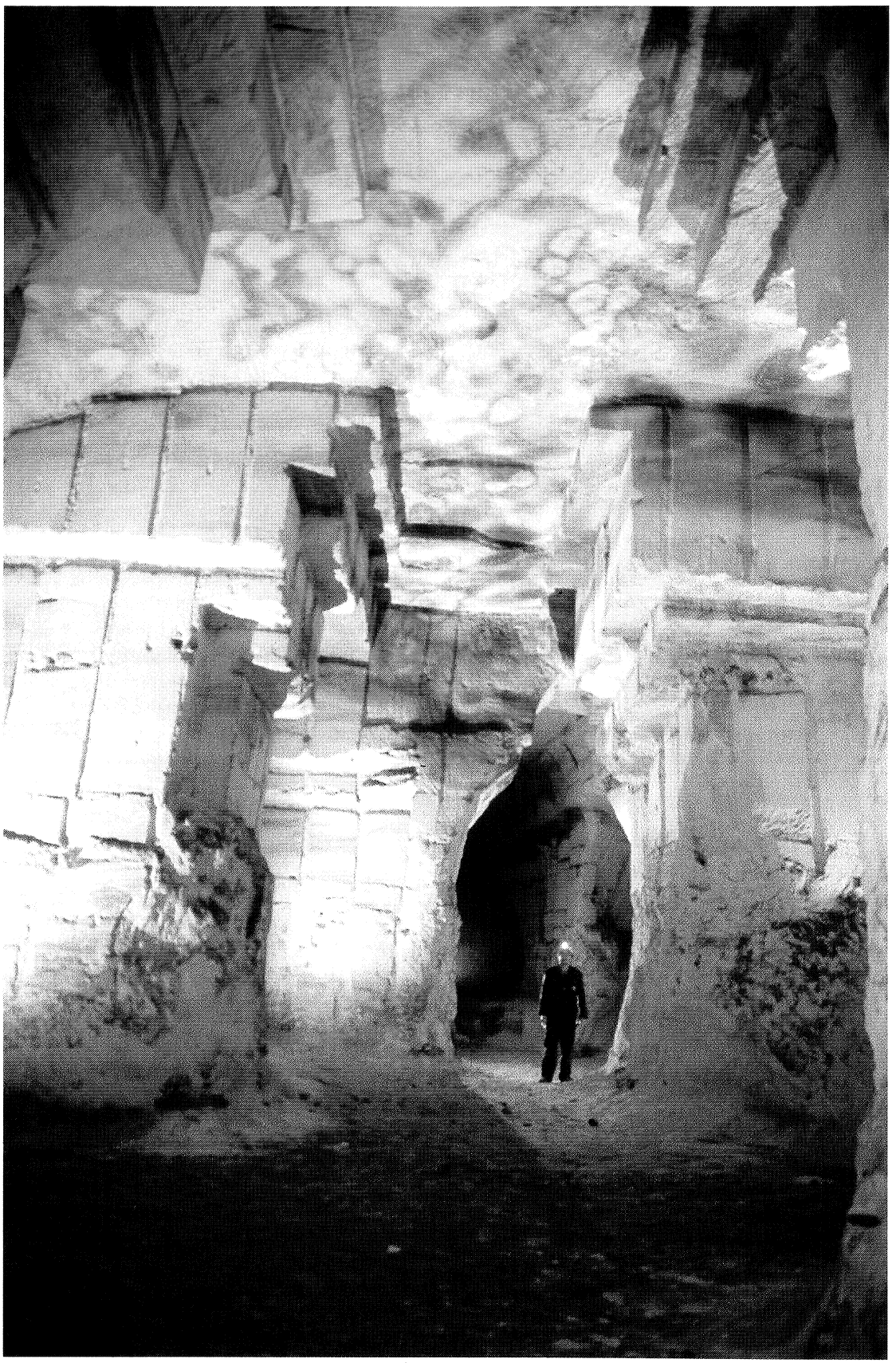


Figuur 20. Hinnisdael I, zuidwestelijk deel, detail van rechte wand met telraam, een rekensom nagelaten door de blokbrekers, intussen door afdieping voor mergelwinning voldoende hoog om buiten het bereik te komen van hedendaagse inscripties (foto D. De Roest).

Alle auteurs beschrijven de blokbrekerstechniek in verschillende stappen, vertrekkende van een blinde achterwand. Meestal werd van boven naar onder en van rechts naar links gewerkt (in geval van rechtshandigheid) tot men op ongeschikte lagen of op grondwater stootte. De blokken, 'stoelen' genoemd, werden bekomen na uitbeitelen en uitzagen van horizontale en verticale sleuven tegen de wanden en uitzagen van verticale voren waarna de blokken konden uitgebroken (gekanteld) worden. De blokken waren gemiddeld 40 cm breed (afstand tussen de smalle voren), 75 cm diep (reikwijdte van de blokzaag), terwijl de hoogte sterk kon variëren tussen 40 cm en meer dan 2 m, naargelang de vorm van de galerij (rechthoekig of paraboolvorm) en de aanwezigheid van heterogeniteiten zoals tauwlagen of silexlenzen. Tegen het dak bleven regelmatig blokken zitten, vermoedelijk om stabiliteitsredenen (Fig. 22). Voor de afmetingen werkten

Figuur 21. Topo Hinnisdael I met graafrichtingen, opgemaakt door Olefs & Dahlen 5.10.1990 (op basiskaart, opgemaakt april-mei 1990).

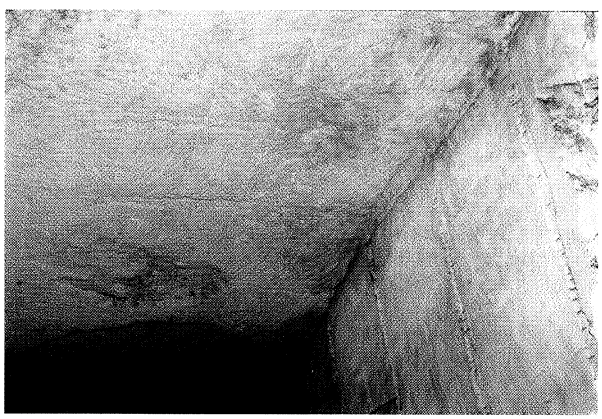




Figuur 22. Hinnisdael I, zuidwestelijk deel, impressie van hoge galerijen met rechthoekige sectie, met rechte wanden bovenaan voor blokbreken, met onregelmatige wanden onderaan voor mergelwinning in het onderste, licht vuursteenhoudende deel van de Kalksteen van Nekum. Uitkragende blokken tegen het dak verschaffen de galerij een paraboolvorm en dragen bij tot een grotere stabiliteit. Hier is nog geen sprake van roofbouw (foto D. De Roest).

de blokbrekers op zicht of volgens hun kracht, want geen twee opeenvolgende blokken hebben exact dezelfde afmetingen. Zij werkten wel met schietlood want de voren lopen mooi verticaal (Fig. 23).
De eerste blok was de moeizaamste operatie want die was enkel vooraan bereikbaar. Die moest met koevoet en wiggen worden losgetrokken. Eenmaal de eerste blok of 'schap' (sjaap) verwijderd was er een 'kas(t)', onontbeerlijk voor het uitzagen van de aangrenzende stoelen, waarvan de eerstvolgende de pikstoel werd genoemd.

Beschrijving van de representatieve Sibbermethode:
stap 1, uitsteken van een sleuf tegen het dak, de 'bovenhouw' (boven-heuj), minimaal 5 cm breed (breedte van de beitel) maar soms zijn er 4-5 beitelsporen naast elkaar naargelang de dikte van de harde tauwlaag;
stap 2, korte gleuf langs de zijwand, de 'pilaarvoor', bestaande uit 2 parallelle zaagsneden gemaakt met de opzetzaag, afwisselend gebruikt met de stootbeitel voor het verwijderen van de vergruisde mergel, bij voorkeur ca 1 m hoog;
stap 3, zagen van een 'lange voor' 40-50 cm terzijde van de pilaarvoor, aan de andere kant van deze eerste blok over de volle hoogte van het werkfront;
stap 4, uithakken van 'onderhouw', bij voorkeur op kniehoogte, zodat eerste blok alleen nog langs achter vastzit;
stap 5, kloppen van ijzeren wiggen in de lange voor totdat de achterwand breekt;
stap 6, met een koevoet wordt het schap gekanteld dat valt op een 'bit', een zandbed van mergelpoeder ('schap trekken');



Figuur 23. Hinnisdael I, noordwestelijk deel met lagere galerijen in volledig rechthoekige sectie, zicht op zijwand en dak. Tegen de zijwand gladgezaagde blokken, gescheiden door verticale beitelsporen, gemaakt in de korte voor aan de achterkant van iedere blok en eveneens afgetekend in het dak, op onderlinge afstand van 70-75 cm. In de hoek tussen zijwand en dak de brede beitelslagen van de bovenhouw. In het dak tussen de waaiervormige beitelsporen de fijne sporen van de lange voor, verticaal gezaagd in de lengterichting van de galerij met onderlinge afstanden van 40-45 cm (foto J. Frankie).

stap 7, vanuit de krappe plaats nagelaten door het schap kon de aangrenzende 'pikstoel' langs achter met een korte voor worden losgezaagd, vervolgens werd een frontale lange voor gezaagd, de voet gebroken en de stoel gekanteld op een zandbed;
stap 8, alle volgende stoelen werden op dezelfde wijze gebroken over de volledige breedte van de galerij;
stap 9, de kas onder de eerste stoel werd ook losgestoten.

Bij het vallen van hoge stoelen braken deze doorgaans in 2-3 stukken volgens 'legers', heterogeniteiten in het gesteente zoals oesterbanken of grove fossielgruislagen. Nadien werden de liggende blokken in handzame bouwblokken 'op maat' verzaagd. De grootte van de blokken, tot 35-40 cm breed x 24 cm diep x 18-20 cm hoog (13-18 cm in Vechmaal), werd gecompenseerd door het lage soortelijk gewicht, een gevolg van de extreem hoge porositeit.

De exploitatiemethode toegepast in de mergelgroeven staat in de mijnbouw bekend als kamer en pijler methode (room and pillar mining). Dit is de beste methode om metersdikke horizontale of zwakhellende lagen te ontginnen. De verhouding tussen kamers (uitgegraven galerijen) en pijlers (resterende pilaren ter ondersteuning van het dak) is een maat voor de efficiëntie. Een berekening op basis van digitale grotplannen beschikbaar voor Hinnisdael I en II toont aan dat 80% van de laag afgebouwd is (cf. infra). Alhoewel een deel van de vrije ruimte op het conto te schrijven is van roofbouw en bijbehorende instortingen is dit toch een verrassend efficiënte prestatie in een uitzonderlijk zacht gesteente (min. druksterkte ca 13 Mpa, max. toelaatbare druk 4 Mpa voor de Kannerblok, maar al 30 Mpa voor de Zicherblok, Macar, 1947).

De exploitatievorm van de gangen is aangepast aan het effect van de drukontlasting in het gewelf. In zones met veranderlijke gesteentedruk (bijv. bij snelle toename van de dikte der deklagen onder de beboste helling tussen het centrale weiland van de Mergelkuilen en het omgevende leemplateau) of geringe dikte van de dragende dekgesteenten (door ontginning tot vlak onder de top van het tufkrijt zodat de drukontlasting ook ingrijpt op de afsluitende tongeriaanzanden) neemt de galerij een paraboolvorm aan (van Schaik, 1997). Een vlak dak voor de galerijen komt enkel voor in diepere gedeelten van de grot, waar ook het dekgesteente dikker wordt (bijvoorbeeld in de richting van de heuvelrug gevolgd door de weg naar Oreye voor Hinnisdael I en II). De grotere drukontlastingszone in het dak van de exploitatie wordt er volledig gedragen door kalksteen, waarbij de blokbrekers ervoor zorg droegen dat een harde bank de top van de galerij vormde (minder kruip en minder gevaar voor onverwachte instortingen op een later tijdstip)[20].

[20] Problemen van instortingen worden behandeld in het hoofdstuk over de geologische risico's.

De ontginningsmethode is sterk gedetermineerd door de lithologie. Men ging voor de economisch interessante laag: waarom zou anders in de Waterkuil zo nauwgezet de Hardground van Caster op het contact tussen de Kalkstenen van Meerssen en Nekum gevolgd zijn, ondanks de wateroverlast, terwijl er hoger nog een metersdik pakket Meerssen Kalksteen onaangeroerd is gebleven? Tauw of hardground[21] lagen , in casu de fossielbanken in de Horizont van Kanne (in de Champignonskuil) en de Hardground van Caster (in de andere grotten) fungeerden dank zij hun grotere 'taaiheid'[22] of hogere mechanische sterkte als meer resistente lagen om het dak van de exploitatie te schragen. De onderkant van de bouwsteenproductiezone kwam overal overeen met de top van de onderste silexzone in de Kalksteen van Nekum.

Zeven meter leem en twee meter tongeriaanzand volstaan blijkbaar als afsluitende laag, ondoorlatend voor het percolerende regenwater, een voorwaarde om veilig tot ondergrondse mergelwinning te kunnen overgaan.

De exploitatie kan gehinderd worden door dolines en orgelpijpen. Diepe dolines gevuld met tongeriaanzand markeren de instortingszone tussen Hinnisdael I en II (Champignonskuil). Elders, voornamelijk berginwaarts, eindigt de exploitatie op blinde wanden. Waarom is dan de exploitatie gestopt? We kunnen gissen dat dit ten dele kwam door de sterke roodverkleuring, te zien in het noordwestelijke deel van Hinnisdael I[23]. Dit leverde allicht een commercieel minder interessant product, al kan de felrode kleur verbleken door blootstelling aan daglicht. Maar de bouwsteengrondstof is zeker niet uitgeput.

Veranderingen aangebracht door de champignonkwekers beperkten zich tot het delven van verluchtingskokers, noodzakelijk omwille van de gistende paardenmest op de kweekbedden, telkens een in Hinnisdael I, II en VII. Verder werden waterbakken, kleine dammen en verhoogde bedden aangebracht. Andere effecten waren de opvulling van overtollige gangen en het afschrapen van pijlerhoeken door passerende voertuigen.

4.2. Productie

Welke volumes aan mergel werden nu effectief uitgebaat in de Mergelkuilen? Op basis van het grotplan gecombineerd met de hoogte en de vorm van de galerijen kan een berekening van het uitgebaat volume gemaakt worden. We voerden deze berekening uit voor de Grote Kuil of Hinnisdael I omdat we voor deze grot over systematische hoogtemetingen van de galerijen beschikken. Met behulp van het softwareprogramma AutoCad werd vooreerst de totale oppervlakte van het gangenstelsel berekend.

[Totale oppervlakte] – [oppervlakte som pijlers] =[uitgebate oppervlakte]
3714,81 m² - 762,79 m² = 2952,02 m²
80% van de oppervlakte is dus ontgonnen en 20% is blijven staan als pijler

Uitgaande van de hoogtemetingen (in het midden van de galerij en dus bij benadering de grootst meetbare hoogte) en de breedte van de gang (op ooghoogte, dus zonder eventuele instulpingen door latere roofbouw of erosie) wordt een rechthoekige doorsnede bekomen.
Berekening van uitgebaat volume met rechthoekig profiel = 13978 m³

Deze berekening houdt uiteraard een overschatting in daar de galerijen eerder boogvormig zijn dan rechthoekig. Om een meer betrouwbaar volume te bekomen werden 4 profielen gedigitaliseerd van foto's van de galerijen (Fig. 24). Uit onderstaande tabel blijkt dat het profiel tussen 78% en 67% van de rechthoekige sectie bevat. Dus ongeveer 70% van het volume met rechthoekig profiel benadert het effectief uitgebate volume.

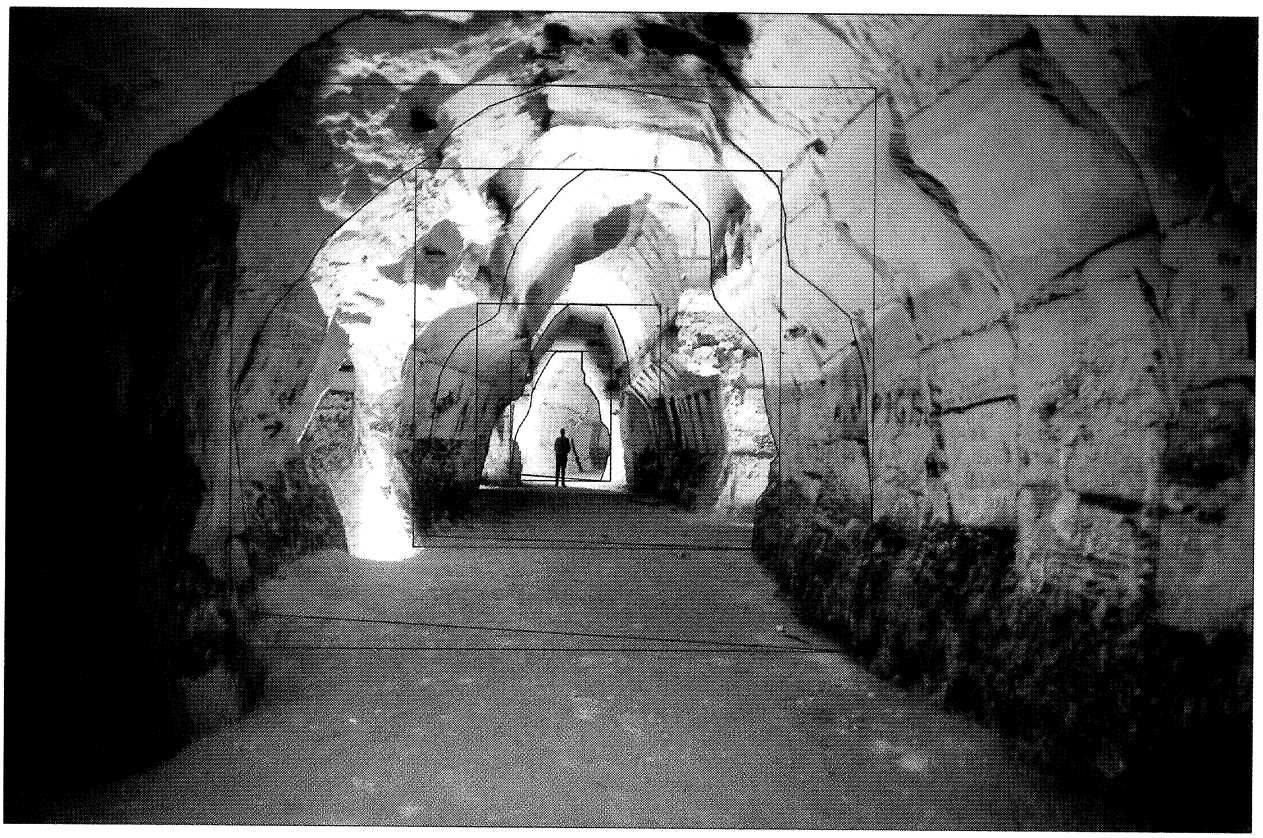
Er dient opgemerkt te worden dat deze volumeberekening slechts een eerste benadering is. Slechts vier profielen uit de hoofdgalerij werden gedigitaliseerd en deze waarden werden in tabel 3 geëxtrapoleerd naar de gehele grot. Een echt nauwkeurige volumeberekening zou vereisen dat voor iedere galerij of sectie van de grot de geëigende doorsnede wordt gebruikt. In de diepste helft van de grot, berginwaarts van de hoofdgalerij[24], bezitten de

[21] Hardground: steenbank die sterker verkit is dan de omgevende lagen, meestal het geval van een sedimentatiestilstand zodat intensieve begroeiing door incrusterend organismen en kolonisatie door gravende organismen mogelijk was. De verkitting kan zowel van biologische (gesteentebouwende organismen zoals serpula's of kalkkokerwormen, kalkwieren en koralen) als van vroegdiagenetische aard zijn (opheffing geassocieerd met circulatie van meteorisch water). Hardgrounds markeren een overgang tussen verschillende sedimentatieperioden en worden dus vaak gebruikt als grenslaag in de lithostratigrafie.

[22] Het begrip tauw (tawe in het Waals) heeft dezelfde oorsprong als het woord 'taai' en werd door de blokbrekers gebruikt voor alle hardere lagen, zowel vroegdiagenetisch verkitte fossielgruislagen als hardgrounds. Deze lagen waren harder, moeilijker te verpulveren of te breken maar anderzijds ook niet geschikt als verzaagbare bouwsteen. In het geval van bouwsteen wordt het begrip tauw in enge zin gebruikt voor verharde, verkiezelde fossielbanken.

[23] Dit vooralsnog onverklaarde fenomeen wordt nader beschreven in het hoofdstuk Sedimentologie van de kalksteen van Nekum. Zie ook fig. 22 voor vlekvormige patronen van roodverkleuring en fig. 39 voor meer intense roodkleurige banden.

[24] Op de oorspronkelijke schets van Hinnisdael I, getekend door J. Fairon (1977-78), wordt deze noord-zuid verlopende hoofdgalerij, komend vanuit Hinnisdael II, de "Rue de Paris" genoemd, naar de naam gegeven door de champignonkwekers. Deze galerij met boogvormige doorsnede vormt de scheiding tussen het berginwaartse deel van de grot, met rechthoekige doorsneden onder een dikkere bedekking, en het minder stabiele deel, gelegen onder de helling die de Mergelkuilen begrenst.



Figuur 24. "Rue de Paris", naam gegeven aan de noord-zuid gerichte hoofdgalerij van Hinnisdael I door Franse champignonkwekers, met 4 gedigitaliseerde secties voor volumeberekening (foto D. De Roest).

meeste gangen wel een rechthoekige doorsnede. Zou men hiermee rekening houden, gaat de totale mergelsteenproductie van Hinnisdael I eerder boven 10000 m^3 uitkomen. Hiervan zou zo 'n 70% als bouwsteen kunnen zijn ontgonnen.

Voor Hinnisdael II (Champignonskuil) is de volumeberekening minder goed uit te voeren daar deze grot voor een groot deel terug is opgevuld door de instroom van modder, en de oorspronkelijke hoogtes van de galerijen niet gekend zijn (zie verder, 'Opvulling van de Champignonskuil').

Een vergelijking van de uitgebate oppervlakte t.o.v. de som der oppervlaktes van de pijlers is nochtans uitgevoerd:

totale oppervlakte uitbating: 3560,87 m^2

som van pijlers: 825,64 m^2

Dus 76,5% van de oppervlakte is ontgonnen en 23,5% is blijven staan als pijler. Dit is bijna van dezelfde grootteorde als de 20/80 verhouding voor Hinnisdael I. Vermits de sectie naar onder, in het opgevulde deel, de neiging

Uitgebaat volume (in m^3) berekend met rechthoekige doorsnede	% oppervl. gedigitaliseerde / rechthoekige doorsnede	Uitgebaat volume (in m^3) berekend met gedigitaliseerde doorsnede
13978	78,4	10958,75
	71,4	9980,29
	67,3	9407,19
	68,6	9588,91
Gemiddelde van 4 doorsneden	71,4	9983,79
Gem. van laatste 3 doorsneden	69,1	9658,80

Tabel 3. Variatie in volumeberekening volgens de doorsnede van de galerijen, met de verhouding tussen de werkelijke doorsnede gedigitaliseerd voor 4 secties t.o.v. een rechthoekige doorsnede op basis van de hoogte in het midden van de galerij, voor de hoofdgalerij van Hinnisdael I, en invloed hiervan door extrapolatie op het totale uitgebate volume van Hinnisdael I.

vertoont breder te worden en sommige lagere galerijen volledig opgevuld zijn en dus buiten plan gebleven zijn, zou een analoge meting zonder opvulling zeker de verhouding 20/80 bereiken. Een vergelijking tussen de plannen van Hinnisdael I en II maakt inderdaad duidelijk dat de pilaren in deze laatste grot wat groter uitvallen, alhoewel beide nochtans ontstaan zijn als delen van eenzelfde grottenstelsel.

5. Stratigrafie

5.1. Afdekkende lagen

De gesteentelagen die in Vechmaal kunnen waargenomen worden zijn van Quartaire tot Krijt ouderdom. Zij rusten op een rotsondergrond met de vroegpaleozoïsche gesteenten van het Massief van Brabant waarover in de regio vrijwel niets bekend is. De afdekkende lagen hellen af naar het noorden, in de richting van de dalende Roerdalslenk die het noordoosten van de provincie Limburg doorsnijdt. Door deze kanteling dagzomen in zuidelijke richting steeds oudere lagen; door de toenemende afstand tot de subsidentiecentra van het Noordzeebekken en de Roerdalslenk worden de afzettingen dunner en komen er steeds meer hiaten voor. Hierdoor zijn in Droog Haspengouw de Krijtlagen aan de oppervlakte of onder een dunne zand-leem bedekking te vinden.
Dat het Haspengouwse landschap door een dikke leemmantel is overdekt is duidelijk in topografie en landgebruik. De leemlaag bereikt een dikte van 2 tot 7 m, gemiddeld 4-5 m. Op het einde van de laatste ijstijd, ca 20.000 jaar geleden, verdwenen oneffenheden in het ijstijdlandschap onder een eolische loesslaag waardoor enkel zachte glooiingen overbleven. Door ontkalking en bodemvorming werd de loess in leem omgezet.

Op de Waterkuil ligt de leem rechtstreeks op het tufkrijt, elders ligt er een Tertiaire zandlaag tussen.

In de tijdsspanne tussen het laat Quartair en het vroeg Oligoceen zijn nog verschillende zand- en kleilagen afgezet (vermoedelijk overeenkomend met het Zand van Bolderberg en de zanden en kleien van de Rupel Groep) maar die zijn door opeenvolgende erosiefasen opgeruimd. De erosie was het gevolg van de geleidelijke opheffing die in de Hoge Venen op de Ardennen zijn culminatiepunt bereikt heeft. Enkel de silex-rolkeien uit het basisgrind van die formaties bleven achter en kwamen terecht in de overdekkende leem, of werden opnieuw uitgespoeld en als keienbedden geconcentreerd zoals bijv. in de opvulling van de Hinnisdael II (Champignonskuil) goed kan waargenomen worden. Een bijzonder geval zijn de "zoetwaterkwartsieten"[25], ontstaan ca 35 miljoen jaar geleden in het Lid van Alden Biesen (Formatie van Borgloon, traditioneel bekend als het continentale Tongeriaan) die als getuigenstenen de langdurige erosiefasen overleefd hebben (Tabel 4). Alhoewel de zoetwaterkwartsieten rond de Mergelkuilen nergens in het veld werden waargenomen[26] is hun aanwezigheid in het verleden niet onopgemerkt gebleven en werden ze in de regio gebruikt als ruwe, onbewerkte bouwsteen, tussen de meer gebruikelijke silex en tauw (Dreesen, Dusar & Doperé, 2002)-(Fig. 25).

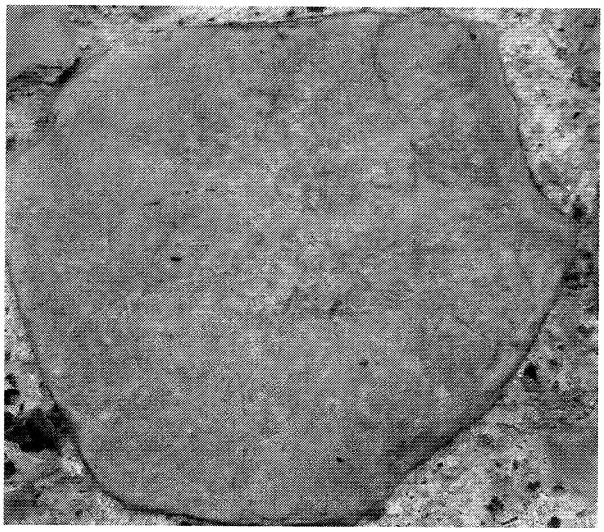
Het onderliggende mariene Tongeriaan is het resultaat van een sterke transgressie met gelijkmatige afzettingen die over een groot gebied worden teruggevonden. Onder de bruine leem komt een geelgroengrijze tot lilabruine zandlaag voor, bestaande uit zeer fijn, goed gesorteerd, kleiig tot sterk kleiig zand met fijne donkere glauconietkorrels en glinsterend witte micaschilfers. Door oxidatie van de glauconiet en de klei komen in dit zand meermaals roestbruine tot oranjebruine strepen en banden voor volgens

steensoort	**lithostratigrafische toewijzing**
leem	Quartair
zoetwaterkwartsiet	Formatie van Borgloon, Lid van Alden Biesen
Tongeriaans plakzand	Formatie van St.-Huibrechts-Hern, Lid van Grimmertingen
witte mergel	Formatie van Heers, Lid van Gelinden
groenzand	Formatie van Heers, Lid van Orp
tufkrijt met hardgrounds	Formatie van Maastricht, Lid van Meerssen
tufkrijt met silex en tauw	Formatie van Maastricht, Lid van Nekum

Tabel 4. Lithostratigrafische opeenvolging van de aardlagen voorkomend in Vechmaal (de Formatie van Borgloon is niet gevonden in de Mergelkuilen van Hinnisdael, de Formatie van Heers enkel als residu in karstdepressies).

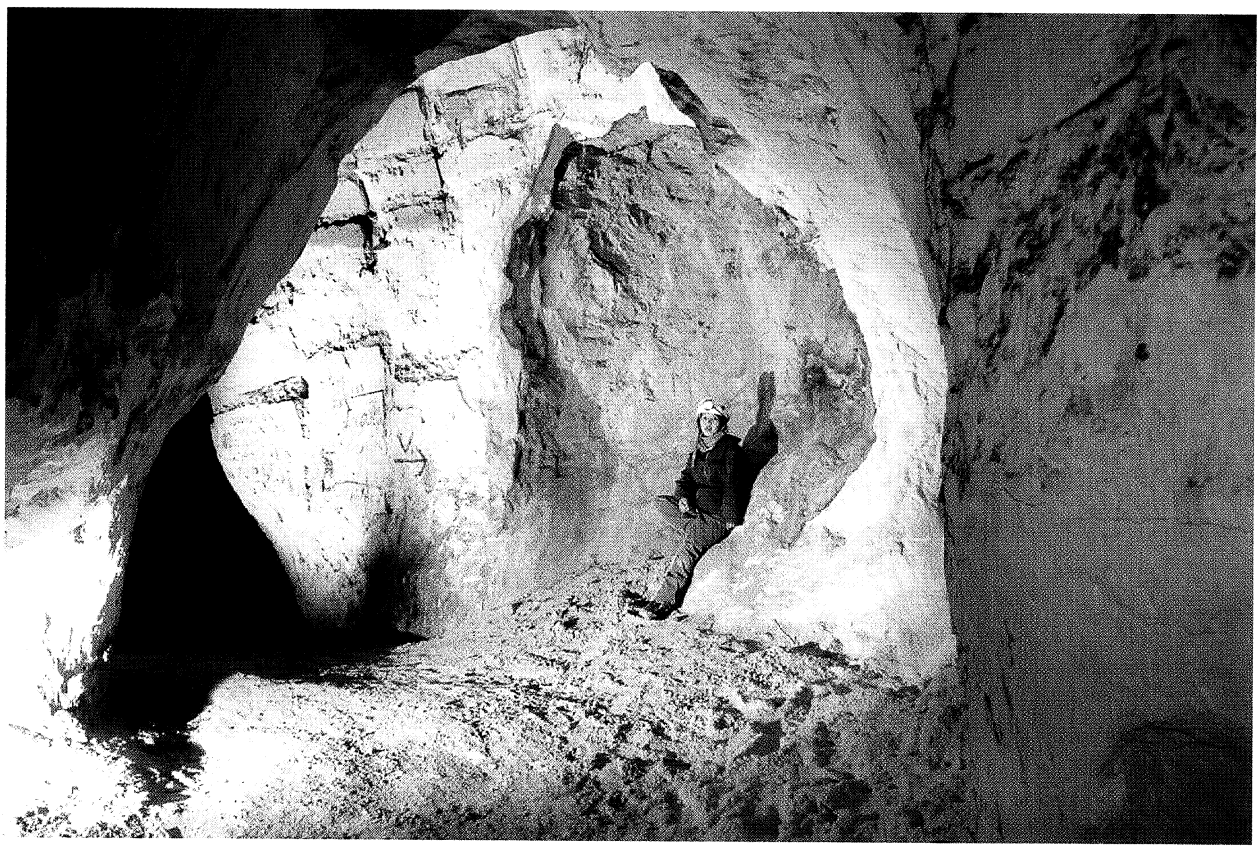
[25] Naam bedacht door Nederlands-Limburgse amateurgeologen voor de goed gecementeerde kwartsarenieten met kwabvormige oppervlakken die soms als metersgrote getuigenstenen zijn bewaard. Zij ontstaan door lokale verkiezelingsprocessen in zandlagen, geassocieerd met veen- of bruinkoollagen die een sterk uitlogend effect hebben op de omgevende zanden (cf. Dreesen et al., 2002).

[26] Zoetwaterkwartsieten en *potamides*-kwartsieten uit het continentale Tongeriaan (cf. Dreesen et al., 2002) worden regelmatig teruggevonden op hooggelegen hellingen in de richting van Heers, Borgloon en Tongeren. De getuigenstenen die in Vechmaal als bouwsteen werden gebruikt zijn dus mogelijk afkomstig van het noordelijke deel van het grondgebied van Vechmaal.



Figuur 25. Zoetwaterkwartsiet uit de Formatie van Borgloon als ruwbehouwen steen verwerkt in de ondermuur van een boerderij te Vechmaal (foto M. Dusar).

een grillig patroon, de z.g. liesegangringen. Dit zand is zo fijn en dichtgestapeld, bovendien met kleimatrix, dat het als waterkerend mag worden beschouwd. Het werd vroeger als plakzand gebruikt voor pleisterwerken. Dit zand wordt stratigrafisch gerangschikt in het Lid van Grimmertingen van de vroeg-Oligocene Formatie van St.-Huibrechts-Hern met een ouderdom van ca 36-38 miljoen jaar, maar staat ruim bekend als het tongeriaanzand[27]. Ook de Formatie van St.-Huibrechts-Hern zelf is sterk geërodeerd. De normale dikte ervan bedraagt 20 m; rond de Mergelkuilen van Hinnisdael worden hooguit enkele meters aangetroffen[28]. Vermoedelijk is het tongeriaanzand bewaard dank zij oplossing van de onderliggende kalksteen waardoor de afdekkende lagen inzakten en alleszins hun basislagen beschut werden tegen verdere erosie. Veel grotgangen rond de Mergelkuilen eindigen op oplossingsdolines gevuld met dit tongeriaanzand (Fig. 26). Dit proces is nog niet gestopt. In de galerijen van Hinnisdael I en II zijn meerdere ronde dakbreuken te zien met een venster op het bovenliggende tongeriaanzand



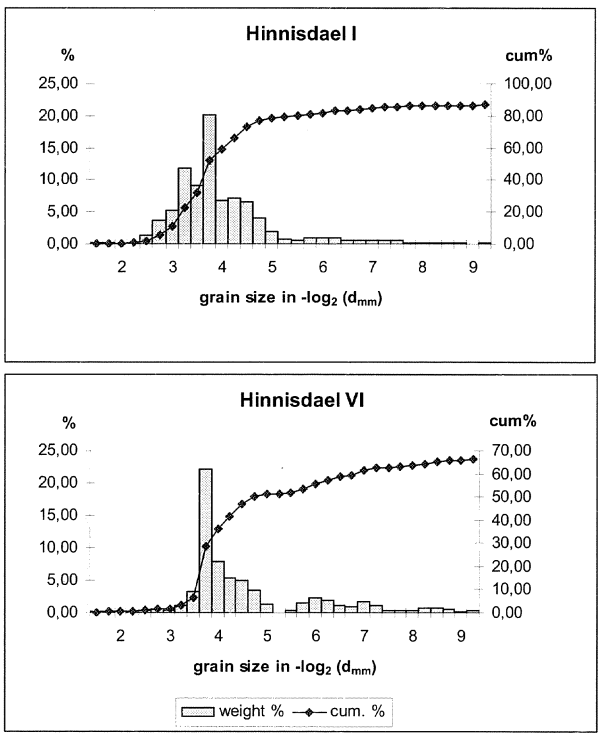
Figuur 26. Grote oplossingsdoline gevuld met tongeriaanzand (Formatie van St.-Huibrechts-Hern). Hinnisdael I (foto D. De Roest).

[27] Tongeriaan is een verouderde chronostratigrafische term voor het tijdperk waarin zowel de oudere, mariene Formatie van St. Huibrechts-Hern als de jongere, continentale Formatie van Borgloon werden afgezet, die nu samen lithostratigrafisch tot de Tongeren Groep worden gerekend, afgezet tijdens de overgang van Priaboniaan (de internationale chronostratigrafische benaming die i.p.v. Tongeriaan moet gebruikt worden) en Rupeliaan (Laga et al., 2001). Ook het traditionele woordgebruik slaat op de afzettingen en moet dus steeds in lithostratigrafische zin geïnterpreteerd worden.

[28] Boringen, in 1981 als voorbereiding op de landschapsbescherming uitgevoerd over het zuidelijk deel van de gemeente Vechmaal (gebied bedekt door de geologische kaartjes, fig. 31-32) gaven een maximum van 4 m tongeriaanzand. Mergel van Gelinden werd enkel aangeboord in het vlakkere, lagergelegen gebied naar de dorpskern toe (Baeyens, L., 1981. Nota. Afbakening van de zone met gevaar voor verzakking. Commissie van Advies, notulen nr. 4).

dat vooralsnog goed standhoudt tegen instorting (zie hoofdstuk karst). In de basislagen zijn door verwerings-processen verhardingen en stevige zandige kleibanden ontstaan. Korrelgrootte-analyse van twee zandmonsters uit de basislagen van dolines gevuld met tongeriaanzand tonen aan dat het sediment bestaat uit fijn zand tot silt met grote kleifractie (Fig 27; Tabel 5).

Onder het tongeriaanzand ligt een vette witte mergel, bekend als de Mergel van Gelinden, eventueel met een groen, glauconiethoudend basiszand. Vechmaal ligt aan de westelijke uitwiggingsgrens van deze mergellaag en boven op de grotten komt de Mergel van Gelinden in normale superpositie niet meer voor. Er zijn echter uitzonderingen: in Hinnisdael I en VI werden grotere oplossingsdolines gevuld met tongeriaanzand aangesneden, waarin onderaan tot 50 cm dikke schijven vaste witte mergel voorkomen (Fig. 28). Bij het inzakken van de doline zijn de mergel en het zand vermengd waarbij de stijve mergel verbrokkelde tot een breccie die uitloopt in slierten van hoekige fragmenten tot centimetergrootte (Fig. 29). Dit wijst erop dat de Mergel van Gelinden oorspronkelijk over een groter gebied voorkwam, maar dat enkel op beschutte plaatsen een residu van deze afzetting is achtergebleven. Dergelijke residuele afzettingen komen voor in dolines. Dit betekent dat oppervlakkige oplossing van de kalksteen met dolinevorming reeds na de afzetting van de Mergel van Gelinden en vóór de afzetting van het tongeriaanzand heeft plaatsgevonden, in de tijdsspanne tussen 58 en 38 miljoen jaar geleden, en dat er na de afzetting van het Tongeriaan en lang voor de afzetting van de leem opnieuw dolinevorming voorkwam.



Figuur 27. Korrelgrootteverdeling van 2 zandmonsters uit de basis van het tongeriaanzand (Formatie van St.-Huibrechts-Hern) in dolines aangesneden in Hinnisdael I (Fig. 61 uiterst zuidoost) en in Hinnisdael VI (Fig. 11 oost, afbeelding op fig. 29): gewichtsklassen (staven) en cumulatieve gewichtsverdeling (ruitjes) van de zand- en siltfractie volgens meting met zeef en sedigraaf (SEDAN 2001 grain size analysis, KBIN, naar Folk, 1966, horizontale as volgens PHI logaritmische korrelgroot-teklassen: Φ 2 = 250 µm; 3 = 125 µm; 4 = 62,5 µm; 5 = 31 µm; 6 = 16 µm; 7 = 8 µm; 8 = 4 µm; 9 = 2 µm).

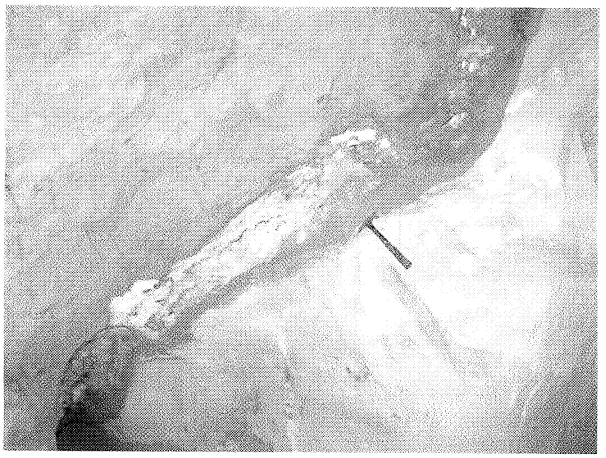
5.2. Krijtlagen

In Vechmaal is het Maastrichts tufkrijt ontsloten dat algemeen werd geëxploiteerd. De kalksteen is immers zeer zuiver en homogeen met een gemiddeld $CaCO_3$ gehalte rond 98% (Felder & Bosch, 2000). In de mergelgrotten komen twee bovenste leden voor van de Formatie van Maastricht, het jongere Lid van Meerssen dat goed ontwikkeld is in de Waterkuil, en het oudere Lid van Nekum dat in de grotten rond de rechthoekige 'Mergelkuil van Hinnisdael' best te zien is (Felder, 1975; Felder & Bosch, 2000) - (Fig. 30). De basis van het Lid van Nekum en het contact met het onderliggende Lid van Emael wordt nergens bereikt, maar wordt wel in boringen aangeboord, net als het onderliggende wit en vuursteenrijk Gulpens Krijt. De totale dikte van het Krijt wordt geschat op 75 m.

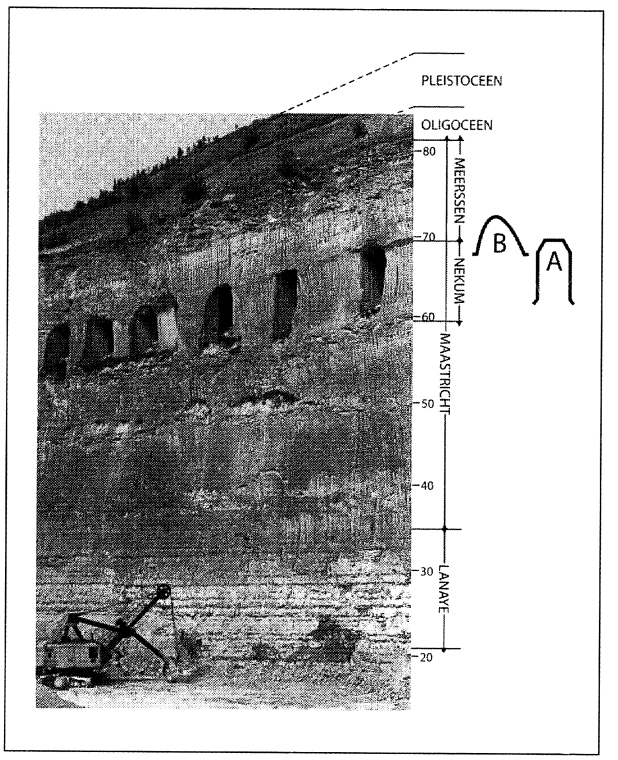
	Hinn. I	**Hinn. VI**
Lithologische fracties		
Zand	59 %	36 %
Silt	28 %	29 %
Klei	14 %	34 %
Percentielen (µm)		
1st percentiel	202	177
16th percentiel	116	85
50th percentiel (M)	77	37
84th percentiel	9	(klei)
Moment parameters		
Mediaan (Φ)	5.16	7.57
Mediaan (µm)	27.99	5.26
σ	3.6	4.74
Skewness	2.13	0.8
Kurtosis	6.45	2.15

Tabel 5. Granulometrische parameters (naar Folk, 1966) voor twee zandmonsters uit de basis van de Formatie van St.-Huibrechts-Hern in dolines in Hinnisdael I en Hinnisdael VI (zie fig. 27 voor de korrelgrootteverdeling).

Figuur 28. Mergel van Gelinden, residueel in doline bewaard, als vergleden insluitsel in tongeriaanzand, detail van fig. 26 (foto D. De Roest).



Figuur 29. Gelinden Mergel, als verbrokkelde bank aan de basis van tongeriaanzand in een oplossingsdoline, einde hoofdgang Hinnisdael VI (foto M. Dusar).



Figuur 30. Stratigrafische positionering Mergelkuilen van Hinnisdael t.o.v. typesectie ENCI-groeve in de St.-Pietersberg bij Maastricht (schema uit Felder, 2001).
A: rond de mergelkuilen; B: Waterkuil.

In Vechmaal bedraagt de dikte van het Maastrichts tufkrijt 25 m, met een dikte van 8 à 10 m voor de in de grotten ontsloten leden van Meerssen en Nekum (Tabel 6). Het contact tussen de Kalksteen van Meerssen en Nekum, de Horizont van Caster, is in de Waterkuil spectaculair ontsloten, maar is ook in Hinnisdael I en VI in het dak goed waarneembaar.

De top van het Lid van Meerssen en dus de K/T grens[29] wordt in Vechmaal niet bereikt. Vermoedelijk zijn de allerjongste krijtlagen verweerd en opgeruimd tijdens de langdurige continentale fase die een groot deel van het Paleoceen (met uitzondering van de afzettingsperiode van de Mergel van Gelinden) en het gehele Eoceen omvat (periode 65 tot 38 miljoen jaar geleden) wanneer het land tot boven de zeespiegel werd opgeheven. Omdat de overdekking door Tertiaire lagen – en dus ook de bescherming tegen erosie – naar het zuiden en oosten toe vermindert, wordt de top van de krijtlagen in dezelfde richting steeds ouder. Dit geldt reeds op de schaal van de Mergelkuilen van Hinnisdael: de Kalksteen van Meerssen is nog aanwezig in het noorden van het gebied waar ooit nog een beschermende overdekking door Mergels van Gelinden is afgezet, terwijl in de zuidelijk gelegen Champignonskuil de post-Krijt erosie voor gevolg heeft dat enkel de Kalksteen van Nekum bewaard is.

Formatie van Houthem	Cenozoïcum - Selandiaan
Formatie van Maastricht	Krijt - Maastrichtiaan
Lid van Meerssen	
Lid van Nekum	
Lid van Emael	
Lid van Schiepersberg	
Lid van Gronsveld	
Lid van Valkenburg	
Formatie van Gulpen	
Lid van Lanaye	
Lid van Lixhe	
Lid van Vylen	
Lid van Beutenaken	Krijt - Campaniaan
Lid van Zeven Wegen	
Formatie van Vaals	
Formatie van Aachen	Krijt – Santoniaan

Tabel 6. Stratigrafisch schema van de krijtgesteenten in het Zuid Limburgse typegebied met in vet aanduiding van de in Vechmaal waargenomen lagen. Oudere krijtlagen komen deels ook voor (Emael, Lanaye, Lixhe, Vylen, ZevenWegen) maar zijn niet ontsloten.

5.3. Geologische kaarten

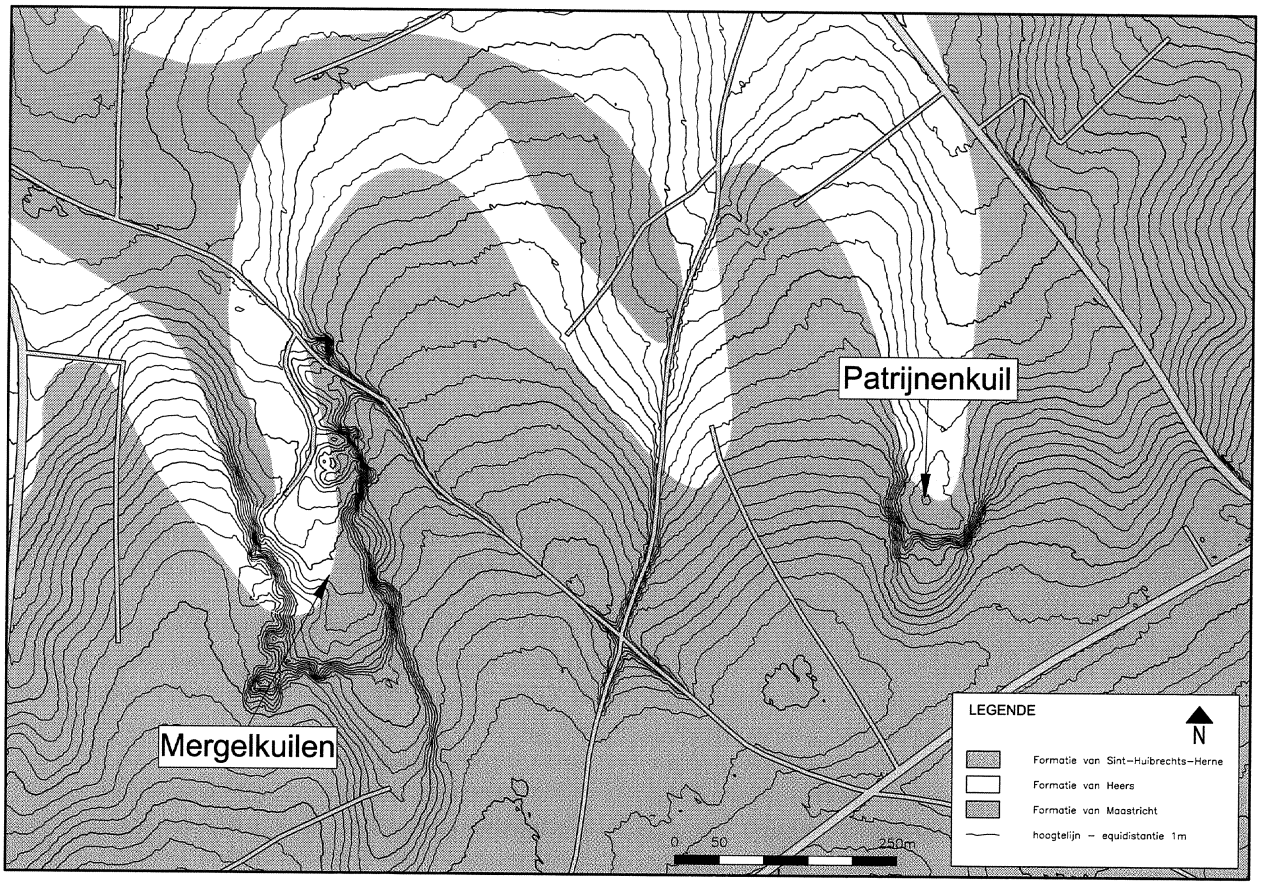
De nieuwe geologische kaart van het Vlaams Gewest (kaartblad 33 St.-Truiden, schaal 1:50.000; Claes & Gullentops, 2001) geeft net als de oude geologische kaart (kaartblad 106 Heers-Borgloon, schaal 1:40.000; Van den Broeck & Rutot, 1902) de superpositie van de Tertiaire lagen en het tufkrijt (Formatie van Maastricht) onder het Quartaire leemdek weer (Figs. 31-32). Daarmee houdt de overeenkomst op.

De oude kaart toont kleine hoefijzervormige vensters op de Krijtlagen ter hoogte van de Mergelkuilen van Hinnisdael, de Patrijnenkuil en in een holle weg tussen beide depressies, terwijl het Krijt elders onder een bedekking met enkele meters tongeriaanzand voorkomt. De Mergel van Gelinden dagzoomt meer noordwaarts in de vallei ter hoogte van Vechmaal-dorp.

In tegenstelling met de oude kaart (Van den Broeck & Rutot, 1902) wordt op de nieuwe geologische kaart (Claes & Gullentops, 2001) een concordante opeenvolging weergegeven, met dagzomende Krijtlagen in de stroomafwaartse beekdalen. Ter hoogte van de mergelgrotten wordt tussen de Formaties van Maastricht en van St.-Huibrechts-Hern ruim 5 m Formatie van Heers ingelast, die er echter niet is als een karteerbare eenheid, tenzij als een geïsoleerd residu in sommige oplossingsdolines. Het fijne kleiige tongeriaanzand van de Formatie van St.-Huibrechts-Hern is immers ontsloten boven de grotingangen en is ook ondergronds meermaals te zien in dolines en dakbreuken. Op profiel 2 van de nieuwe geologische kaart (Claes & Gullentops, 2001) wordt een wig Mergels van Gelinden (Formatie van Heers) ingezakt weergegeven in de Formatie van Maastricht die daardoor overeenkomstig dunner wordt. De ontsloten leden van de Formatie van Maastricht vertonen echter geen diktevermindering t.o.v. het typeprofiel (cf. infra, Stratigrafie).

Mogelijke verklaring voor deze foutieve interpretatie op de nieuwe geologische kaart is de traditionele vermelding 'mergel' of 'bleek mergelig zand' in boorbeschrijvingen, te wijten hetzij aan een meer mergelig uitzicht van de toplaag van het tufkrijt - door verwering neemt de fijne fractie (weliswaar met kalksamenstelling) toe en vermindert de porositeit, met ook meer gevarieerde kleurschakering tot wit-oranje gevlamd - hetzij aan de bleke kleirijke bandjes die aan de basis van het tongeriaanzand voorkomen. Het glauconiethoudend tongeriaanzand bovenop het Krijt is daarenboven soms geïnterpreteerd als het glauconietrijke Zand van Orp dat aan de basis van de Formatie van Heers onder de Mergel van Gelinden voorkomt (Tabel 4).

[29] K/T grens, of Krijt – Tertiair grens, is een internationaal begrip ondanks de vervanging van het geologisch tijdperk Tertiair door het nieuwe tijdperk Cenozoïcum, dat het oude Tertiair en Quartair omvat, bij beslissing genomen in 2004 tijdens het laatste Internationaal Geologisch Congres door de International Commission on Stratigraphy (www.stratigraphy.org.).



Figuur 31. Uitvergroot uittreksel van nieuwe geologische kaart Sint-Truiden (kaartblad 33) op 1:50.000 (Claes & Gullentops, 2001) over de Mergelkuilen van Hinnisdael en de Patrijnenkuil, met concordante weergave van de formaties.

De Formatie van Heers wigt dus net westwaarts van de mergelgrotten van Hinnisdael uit, vermits ze in Vechmaal-dorp wel nog aangetoond is als een karteerbare laag. Deze abrupte uitwigging wordt regionaal volgens een vrijwel rechtlijnige NE-SW grens getrokken, overeenkomend met de veronderstelde begrenzing van het afzettingsbekken van de mergels van Gelinden en onafhankelijk van bekende breuksystemen. Anderzijds blijft de Formatie van Heers net ten westen van de waterscheiding tussen Maas- en Scheldebekken en ligt de uitwiggingsgrens tussen Vechmaal-dorp en Hinnisdael in het verlengde van de NNE-SSW gerichte breuk van Gors-Opleeuw – Vliermaalroot (De Smedt et al., 1981). Tektonische beïnvloeding van de oostelijke grens van de Formatie van Heers en bijgevolg ook van de Krijtvensters mag dus niet uitgesloten worden. In de Mergelkuilen worden trouwens voorbeelden gevonden van een systeem van NE-SW verlopende afschuivingsbreuken van pre-Tongeriaan ouderdom die mogelijk hebben bijgedragen tot de oostelijke, tektonische begrenzing van de Gelinden Mergel.

6. Sedimentologie

6.1. Sedimentologie van de Kalksteen van Nekum

Het tufkrijt bestaat voor vrijwel 100% uit kalkkorrels met onregelmatige vormen, als bioklasten afgeleid van de kalkschalige organismen waaruit ze zijn ontstaan. Organismen met kiezelskeletdeeltjes zoals sponsen en kiezelwieren leverden de organische kiezelverbindingen die konden uitkristalliseren als vuursteen (silex of tauw).

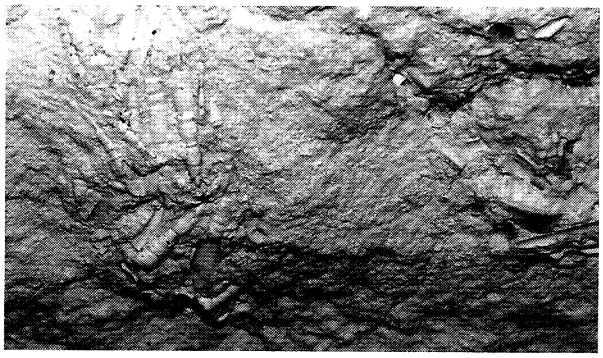
Figuur 32. Uitvergroot uittreksel van gedigitaliseerde oude geologische kaart Heers-Borgloon (kaartblad 106) op 1:40.000 (Van den Broeck & Rutot, 1902) over de Mergelkuilen van Hinnisdael en de Patrijnenkuil (aangegeven door kruisjes), met discordante weergave van de formaties, beter overeenkomend met de waarnemingen op het terrein (schaal en kleurlegende: zie fig. 31).

Een kalksteen die uit kalkkorrels bestaat, afgezet zoals zand, wordt kalkareniet (grainstone) genoemd. Deze kalkkorrels of bioklasten zijn net als zandkorrels volgens weerstand en gewicht, en dus in de praktijk volgens grootte (gemiddeld 0,1-0,4 mm[30]) getriëerd door golfdeining of getijdewerking die de zeebodem kon beroeren. De zeebodem moet permanent onderhevig zijn geweest aan deze waterbeweging want klei kreeg geen kans uit stilstaand water te decanteren. Anderzijds konden stormen heviger waterstroming op de zeebodem veroorzaken, waardoor bedden van kokerwormen (serpula's, vnl. *Pyrgopolon mosae*) en banken van oesters (vnl. *Pycnodonta vesicularis*) werden losgeslagen, zee-egelschalen gebroken, en schelpen en andere kalkschalige fragmenten in banken op elkaar gestapeld. Dit zijn dan de 'fossielgruislagen' die dikwijls worden aangetroffen (Fig. 33).[31] Volledige zee-egelschalen van de soort *Hemipneustes striatoradiatus* die tot 10 cm groot kan worden en verspreid in de fijnkorrelige kalkareniet voorkomen wijzen dan weer op een beschutte omgeving waarin de delicate structuur van kalkplaatjes zijn samenhang niet hoefde te verliezen. *Hemipneustes striatoradiatus* leefde halfingegraven in de zeebodem. Afgestorven exemplaren werden opgevuld en bedekt door een fijne regen van kalkpartikels (Fig. 34). Vervorming van de schalen door compactie van het sediment was in een later stadium echter steeds mogelijk.

De rijke, overwegend benthische fauna en flora en de invloed van golfwerking op de bodem wijzen op afzetting van het sediment in een ondiepe, heldere zee waar het water snel werd opgewarmd en zonlicht tot de bodem kon doordringen (Jagt et al., 1998). Dit was een biologisch

[30] Een granulometrisch monster genomen uit de top van de kalksteen van Nekum aan de ingang van Hinnisdael I (1,25 m boven de Horizont van Kanne) bezat een gemiddelde korrelgrootte van 122 µm, variërend tussen 62,5 en 175 µm. De fijnere fractie bestaat uit door de bewerking sterk vergruisde bioklasten, de grovere fractie uit sporadische resten van grotere, minder vergruisde bioklasten.

[31] Fossielnamen vermeld in dit werk stemmen overeen met de goed ingeburgerde benamingen die in de vulgariserende literatuur gebruikelijk zijn en die toelaten om de macrofossielen op zicht te herkennen. Enkel massaal aanwezige fossielen die belangrijk zijn in de sedimentopbouw en bijvoorbeeld aanleiding geven tot de vorming van fossielgruislagen worden hier aangehaald.



Figuur 33. Serpula's uit het bovendeel van de Kalksteen van Nekum, Hinnisdael I (foto J. Verspreet).

Figuur 34. Grote complete zee-egels, *Hemipneustes striato-radiatus* uit het '*hemipneustes* niveau' onder de Horizont van Kanne, Hinnisdael I (foto J. Frankie).

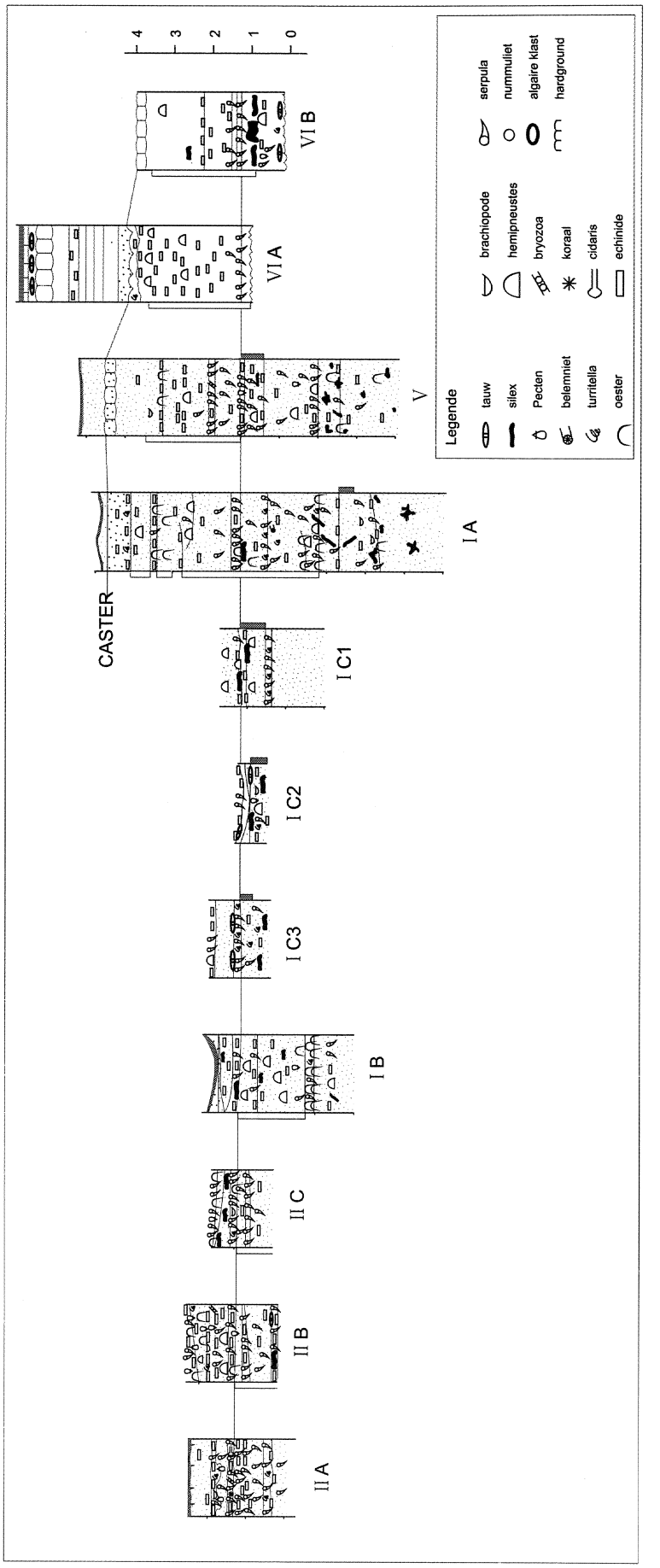
productief milieu waarin grote hoeveelheden koolstof aan de koolstofkringloop werden onttrokken en opgeslagen onder de vorm van carbonaat. Volgens Vonhof & Smit (1996) bedroeg de gemiddelde sedimentatiesnelheid een respectabele 10 cm/ka (1000 jaar) waardoor het gehele ca 10 m dik Lid van Nekum in ruim 100.000 jaar zou zijn afgezet, al dan niet toevallig overeenkomend met een lange Milankovitch cyclus. Dit zijn natuurlijk gemiddelden. Een fossielgruislaag van 20 cm dikte kon wel door een storm op 1 dag worden afgezet, maar diezelfde storm kan daarvoor wel sediment van duizenden jaren hebben opgeruimd.

De zeediepte kan geschat worden op 10-25 m, mogelijk meer want anders zouden Mosasaurussen er zich niet thuis voelen. Vermoedelijk nam de diepte mettertijd af, want we zien van onder naar boven in het sedimentpakket dat het aantal fossielgruislagen en dus de invloed van stormgolven op de zeebodem toenemen (het alternatief, een klimaatswijziging en intensifiëring van de stormen is weinig waarschijnlijk omdat de structuur van de fossielgruislagen en samenstelling of grootte van de bioklasten niet veranderden). Dit past ook in het patroon van een algemene regressie tijdens de afzetting van de Formatie van Maastricht op het einde van het Maastrichtiaan, onderbroken door enkele korte transgressieve pulsen met toenemende zeewaterdiepte, waarvan de laatste zich voordeed tijdens de afzetting van het Lid van Emael. Regressie betekent in dit geval dat de sedimentatiesnelheid hoger lag dan de subsidentiesnelheid en dat de zee dus opgevuld geraakte.

Hierin schuilt ook het verschil tussen het tufkrijt en het eigenlijke witte krijt dat in oudere Krijtlagen voorkomt. Het echte krijt bestaat uit een bijna exclusieve opstapeling van coccolietenplaatjes, een eencellig kalkwier dat als plankton in de fotische zone van open zeeën leefde, door jaarlijkse algenbloei massaal vermenigvuldigde en dan na afsterven naar de zeebodem dwarrelde. Dergelijke opstapeling kon gebeuren in diepere zeeën, met een zeebodem ver onder de golfbasis maar niet diep genoeg om door drukoplossing de kalkneerslagen als bicarbonaten weer in oplossing te brengen. De krijtzeeën waren dan ook min. 50 m tot meerdere honderden meters diep en echte krijtafzettingen komen in grotere diktes en vooral over enorm uitgestrekte gebieden voor (van Ierland tot Rusland, van Noorwegen tot bij de Middellandse Zee).

Het afzettingsmilieu bepaalt ook de structuur van de gevormde sedimenten (Fig. 35)[32]. De zeebodem was ongelijk, met kalkzandbanken, platen van kalkkokerwor-

[32] Verticale profielen (figs. 35 en 53) werden opgenomen voor een beschrijving van de laagopeenvolging en voor de karakterisatie van de voornaamste gidshorizonten, die dan ook voor structurele reconstructies konden worden aangewend. De voornaamste macroscopische fossielassociaties die tot de opbouw van het sediment bijdragen staan op de profielen vermeld, maar zij geven geen overzicht van de totale fossielrijkdom. Hiervoor wordt verwezen naar Defour et al. (1994) en Indeherberge et al. (1996). De microscopische fossielassociaties bestaan uit opgebroken fragmenten van bioklasten, die vermoedelijk goed vergelijkbaar zijn met de 'mesofosielen' van millimeterschaal die tot een essentieel lithostratigrafische onderverdeling op basis van biofacies bijgedragen hebben (zie bioklasten-ecozonatie). Vermits de mergelgrotten een horizontaal verloop kennen werden de profielen gelokaliseerd bij de uitgang of langs instortingszones, waar het mogelijk was om over puinhellingen tot bij het dak van de mergelgrotten te komen. Deze plaatsen zijn evenwel meer onderhevig aan verwering en besmeuring, wat de observaties bemoeilijkt. Profielen C en D op fig. 53 (Kalksteen van Meerssen) werden met behulp van een ladder opgemeten.

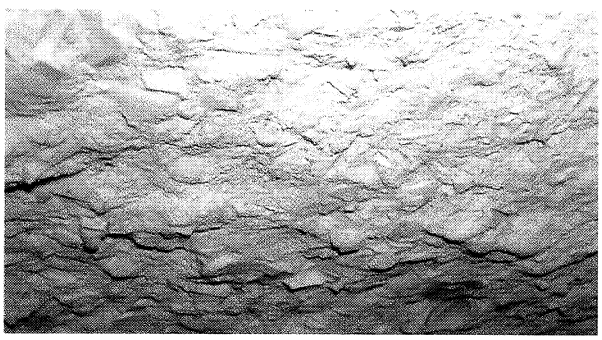


Figuur 35. Correlatieschema stratigrafische profielen in de Kalksteen van Nekum. Lokalisatie: zie figs. 61, 62, 10, 11. De horizontale lijn verbindt de Horizont van Kanne, die als gidshorizont optreedt. Bouwsteenontginning ter hoogte van het profiel is aangegeven door een gele band aan de linkerzijde van het profiel, rode verkleuring door een rode band aan de rechterzijde. Sommige profielen reiken tot in de overdekkende Tertiaire zanden (groene top van het profiel).

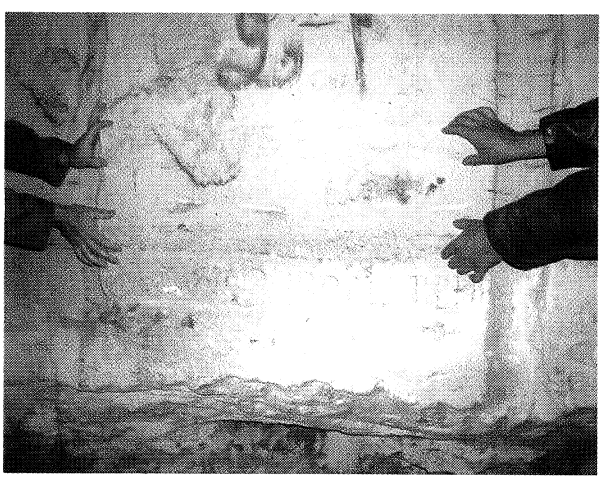
men en oesterbanken. De (kalk)zandbanken zijn onder invloed van stormgolven opgebouwd uit fossielgruis of bioklasten; de platen worden gevormd door kalkkokerwormen en gekoloniseerd door andere organismen die een hard substraat nodig hadden zoals oesters of 'turritella's' (gastropoden waarvan de schaal opgelost is en die dus als steenkern en afdruk bewaard zijn gebleven en soms massaal voorkomen tussen de serpula's of in hardgrounds). In rustige perioden werd het losse kalkzand op de zeebodem bevolkt door detritus-etende zee-egels, waarvan de skeletdelen bewaard werden. Opstapelingen van zee-egelplaatjes boden dan weer een substraat waarop kalkkokerwormen zich konden hechten en nieuwe kolonies stichten. De fragiele basis maakte dat deze kolonies door frequente stormen opgebroken werden en omgezet in een gruislaag (Fig. 36). Organismen in levenspositie worden in het Lid van Nekum zelden aangetroffen. Zelfs complete zee-egels liggen soms kriskras door elkaar. Door organismen gekoloniseerde zeebodems komen voor als 'hardgrounds', perioden van stagnatie in sedimentatiesnelheid bij plotse veranderingen in zeediepte, die gebeurlijk als scheidingsvlak tussen de stratigrafische kalksteenpakketten dienstig zijn, maar die binnen het ontsloten deel van Nekum niet worden waargenomen.

Het Lid van Nekum bestaat zo uit een opeenvolging van fijnere kalkarenieten, onderbroken door fossielgruislagen die als stormafzetting ontstaan zijn. Hierin is geen zichtbare ritmiciteit terug te vinden, te wijten aan klimaatsfluctuaties van astronomische oorsprong (Milankovitch cycli) zoals in oudere vuursteenrijke krijtlagen wel het geval is (Zijlstra, 1994).

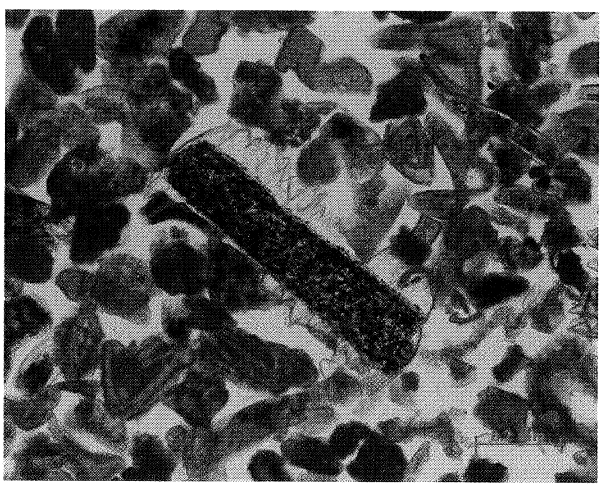
In de mergelgrotten zijn door afwezigheid van mineralogische variatie en beperkte granulometrische variatie laagvlakken moeilijk te onderscheiden. Fossielgruislagen bestaan soms maar uit één enkele laag van grovere bioklasten, soms uit een losse stapeling vermengd met een grote hoeveelheid fijnere kalkareniet, slechts zelden uit een dichte stapeling van grotere fossielen (Fig. 37). De afzet-



Figuur 36. Grofkorrelige basis van lensvormige fossielgruislaag met gevarieerde fossielen (echiniden, schelpen, serpula's) maar hier gedomineerd door fragmenten van Hemipneustes zee-egels; in dak van Hinnisdael II vlak boven de Horizont van Kanne. Deze laag wordt beschouwd als de Horizont van Caster afgezet in een diepe geulinsnijding (paleochannel) zonder hardground-contact (foto L. Willems).



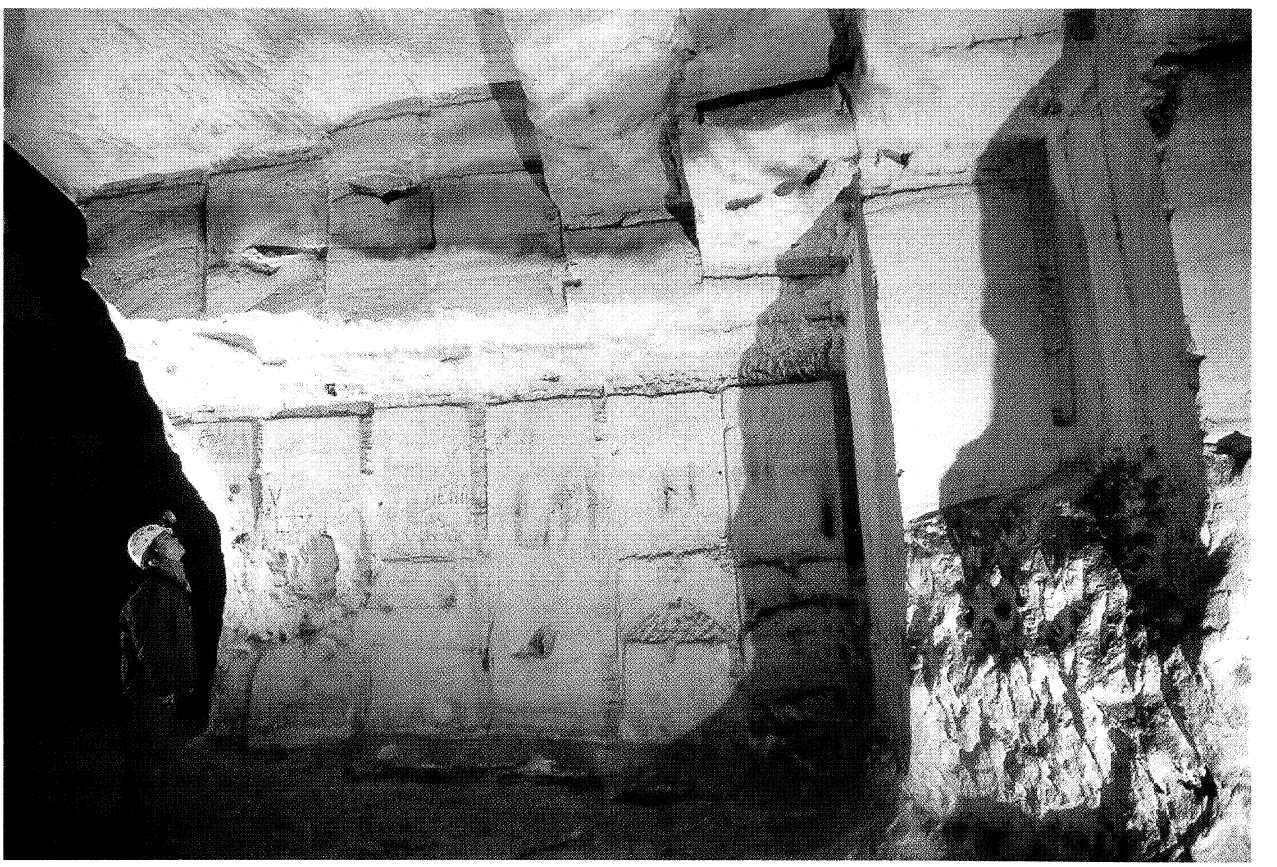
Figuur 37. Ontdubbelde serpulabank, Horizont van Kanne, Hinnisdael II. Witte neerslag verwijst nog naar de champignonkweek (foto J. Verspreet).



Figuur 38. Petrografische beschrijving van een slijpplaatje in de kalkareniet uit de Kalksteen van Nekum (Hinnisdael II). De fijnkorrelige kalkareniet bestaat voornamelijk uit slecht gecementeerd kalkhoudend fossielgruis (bioklasten). Het gesteente wordt volgens de classificatie van Dunham (1962) een bioklastische grainstone genoemd. De bioklasten bestaan hoofdzakelijk uit gerolde fragmenten van fossielen (de korrelgrootte is gemiddeld 125 µm en geheel begrepen in het interval van 50 µm en tot 250 µm) waaronder grote en kleine foraminiferen, crinoïden (zeelelies), stekels van zee-egels, bryozoa (mosdiertjes), mollusken (schelpen) en kalkwieren. De Maastrichtersteen is bijzonder licht, met een soortelijk gewicht van 1,3 tot 1,4 g/cm^3. Aangezien de steen bijna volledig uit calciet bestaat met een soortelijk gewicht van 2,7 g/cm^3 betekent dit dat meer dan 40% van het volume uit porositeit bestaat (Dreesen et al, 2002). In deze studie werd via automatische beeldanalyse een macroporositeit bepaald van 31,2 %. Bij vergelijking met de 40% totale porositeit zal de microporositeit dus ongeveer 10% bedragen. Syntaxiaal rimcement (t.t.z. helder sparietisch calcietcement) wordt preferentiëel aangetroffen rond echninoidenfragmenten (zee-egels en crinoïden).

tingen zijn nogal verstoord door bioturbatie (gravende organismen die de laagstructuur verstoren). Fossielgruislagen zijn lensvormig met hellingen van 5 tot 10° die echter kunnen oplopen tot 30°. Zij zijn dus afgezet in geulen, door erosie uitgeschuurd in de onderliggende kalkarenieten. Dit is soms goed te zien in het dak van de galerijen dat vaak uit beter samenhangende fossielgruislagen bestaat, wat het best waar te nemen is in de grotendeels opgevulde Champignonskuil waar men vlak bij het dak kan komen. Op enkele meters afstand kan zo een fossielgruislaag overgaan van een compacte decimetersdikke bank in een laagvlak met verspreide fossielresten. Terzelfdertijd kunnen lensvormige onder- of bovenliggende kalkarenietlagen verschijnen. Individuele lagen of laagvlakken zijn zo moeilijk te vervolgen. Gelukkig keren dezelfde patronen terug zodat correlatie tussen verschillende delen van het grottencomplex toch mogelijk is.

Een bijzonder kenmerk van het tufkrijt is de hoge porositeit. Losgestapelde bioklasten zijn met puntcontacten onderling verbonden. Deze bruggen bestaan uit cement, 'dogtooth' cement, ontstaan onder invloed van meteorische watercirculatie door opheffing tijdens en na de K/T grens, of syntaxiale overgroeiing bij echinodermata, die door fossilisatie in calciet-monokristallen zijn omgezet (Fig. 38). De licht crême tot oranjegele kleur van het tufkrijt is te wijten aan lichte ijzerbijmenging in het calciet-kristalrooster. Er komen ook enkele decimetersdikke baksteenrode lagen voor, doorgaans met vrij abrupte bovenrand, onder of in een fossielgruislaag, en geleidelijke doch snelle overgang naar het normale kleurpatroon naar onder. Alhoewel deze rode banden enige laterale persistentie bezitten en vooral rond de Horizont van Kanne waargenomen worden (Fig. 39) zijn ze niet gebonden aan een specifiek stratigrafisch niveau; soms lopen ze zelfs schuin doorheen de gelaagdheid. Een verklaring hiervoor moet nog gevonden worden maar het is vermoedelijk een verweringsfenomeen met hematietrode ijzeroxidefilm rond de korrels en in het cement dat voornamelijk hardgrounds en de omgevende lagen aantast.[33]



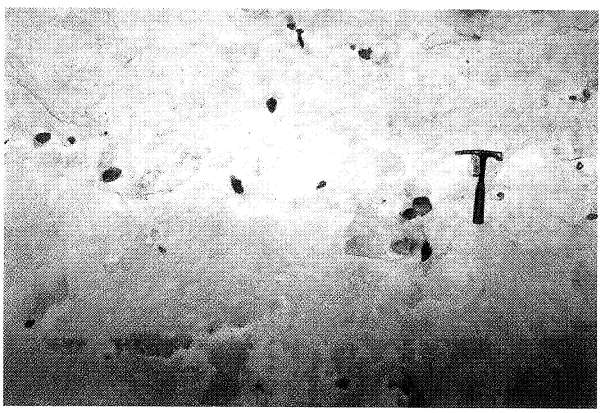
Figuur 39. Dieprode verkleuring in Hinnisdael I, vlak boven de Horizont van Kanne (foto D. De Roest). Deze rode verkleuring is lokaal sterk geprononceerd aanwezig in Hinnisdael I.

[33] Dezelfde oranjerode verkleuring wordt ook aangetroffen in Maastrichtersteen in vochtige (meteorische) omstandigheden, onder mosbegroeiing aan de voet van gebouwen. Een oorzakelijk verband met de activiteit van cyanobacteriën (precipitatie van zouten zoals Ca-oxalaten) is niet uitgesloten maar moet nog nader onderzocht worden. Anderzijds zal de felrode verkleuring, ondergronds vastgesteld, vervagen bij blootstelling aan daglicht.

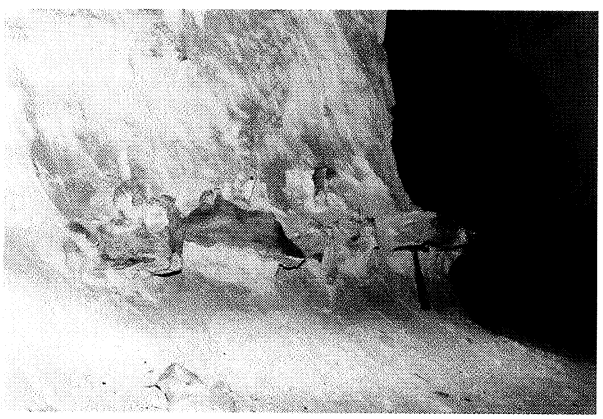
De poriënruimte is vrij gebleven, bij gebrek aan klei of micriet. De resulterende porositeit bedraagt ruim 40% en kan oplopen tot over 50%: de helft van de steen is lucht. Dit heeft gevolgen: laag gewicht (1,35 g/cm^3) en lage druksterkte, of gemakkelijke bewerking en behandeling maar toch hoge duurzaamheid als bouwsteen, en tevens hoge waterbergingscapaciteit en productiviteit als waterlaag (Dusar et al., 2003; Dubelaar et al., 2006).

6.2. Vuursteen of tauw

Er komen twee niveaus met vuursteen voor in de Kalksteen van Nekum. De onderste zone is 3 m dik, met verspreide, meestal kleine knollen (buis-, plaat- of citroenvormig, vertakt) van enkele cm tot maximaal 50 cm groot (Fig. 40), aan de basis soms (Hussenkuil) bankvormig en dik (Fig. 41). De bovenste zone is tussen 0 tot 2 m, meestal 50 cm dik, met vrij grote brood- of schijfvormige knollen tot 1 m doorsnede en 20 cm hoogte.



Figuur 40. Verspreide ronde silex uit de onderste vuursteenlaag in de Kalksteen van Nekum, Hinnisdael V (Hussenkuil)-(foto J. Frankie).



Figuur 41. Silexbank, lokaal gevormd aan de basis van de onderste vuursteenlaag in de Kalksteen van Nekum en geschikt als bouwsteen, Hinnisdael V (Hussenkuil)-(foto J. Frankie).

De onderste zone wordt enkel waargenomen in de meest verdiepte delen van de grotten en het is nergens waar te nemen dat ter hoogte van dit niveau bouwsteenexploitatie is gebeurd, alhoewel het vuursteengehalte van deze zone niet meer dan 5% bedraagt. De onderste vuursteenzone wordt afgesneden door een fossielgruislaag met variabel uitzicht en dikte, die de basis vormt van een laagpakket dat als bouwsteen werd ontgonnen. Er treedt hier dus een kleine, op het eerste zicht onopvallende verandering op in sedimentatiepatroon en diagenese[34].
Het bovenste vuursteenniveau situeert zich rond de fossielgruislaag, bekend als Horizon van Kanne, in het bovenste deel van de als bouwsteen geëxploiteerde zone (zie fig. 19). Deze vuursteenzone komt voor in een laagpakket dat gedomineerd wordt door fossielgruislagen die geulvormig zijn afgezet en ingesneden in het onderliggend

Figuur 42. Bleke, gemakkelijk versplinterende silex met conchoïdale splijting en roze schijn, afkomstig uit het diepere silexniveau in de Kalksteen van Nekum. Uit ondermuur van boerderij gelegen in het centrum van Vechmaal (foto M. Dusar).

[34] Diagenese: textuurverandering die een gesteente ondergaat nadat het werd afgezet. Meestal gebruikt om het versteningsproces aan te duiden. De diagenese van de Krijtlagen heeft niet tot volledige verstening geleid maar er zijn wel beduidende verschillen waar te nemen tussen verstening op basis van kalk- of kiezelcementen.

sediment, waardoor het vuursteengehalte lateraal grote variaties vertoont omdat de bank waarin ze voorkomen kan afgesneden zijn.

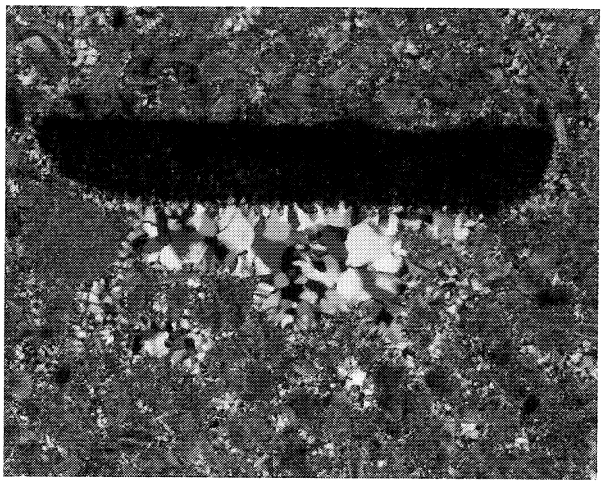
Enkele waarnemingen over het voorkomen:
Opvallend is vooreerst de lichtgrijze kleur, vaak met roze schijn, en de ietwat korrelige textuur, die afwijkend is van de gebruikelijke blauwgrijze, donkergrijze tot zwarte vuursteen uit onderliggende krijtlagen[35] (Fig. 42).
In de onderste zone treedt er een concentratiemaximum op, van waaruit het aantal en in mindere mate ook de grootte van de knollen zowel naar onder als naar boven afneemt. Diep in Hinnisdael I komen aan de basis, tevens de basis van de uitgegraven laag, wel grote schijfvormige concreties voor met doormeter tot 50 cm. Dit niveau is goed opgelijnd tot een bank in de Hussenkuil. Vorm noch concentratie wijzen op een connectie met specifieke laagvlakken of horizonten, eerder op toevallige discontinuïteiten zoals bioturbaties (buisvormig), geïsoleerde fossielresten (dikwijls geïncorporeerd of in de witte reactiezoom rond de knol) of splijtvlakken (plaatvormig). De lengte-as van de knollen staat dan ook dikwijls steil tot verticaal.

In de bovenste zone komen de knollen duidelijk van elkaar gescheiden voor. Er zijn ook gebieden die in dit interval vrij van vuursteen zijn. Het voorkomen is duidelijk gebonden aan fossielbanken. Met name grote zee-egels worden teruggevonden half in half uit de vuursteenknollen. De vorm van de concreties wijst dan weer op ongehinderde circulaire groei rond een kern in een grensvlak tussen fijnkorrelige kalkareniet en een fossielgruislaag. Een aanzienlijk deel van de verkiezelingen bestaat uit tauw dat een vergelijkbare lensvormige morfologie vertoont.

Tauw is de benaming voor versteende hardgrounds of verharde fossielgruislagen die dienstig kan zijn om als stabiel dak de groeve te schragen of om blokken van elkaar te scheiden (Fig. 43). Verkiezelde tauw is een bleke in-situ verkiezeling van kalkareniet, en geen concretie in de strikte zin van het woord (Fig. 44). Vechmaal is bekend voor zijn verkiezelde tauw die talrijke holtes bevat, nagelaten door opgeloste kalkige skeletdelen van fossielen, en die wisselende kalkgehaltes kan vertonen. Het ontstaat zoals de gewone vuursteen, maar dan door vervanging van kalk door kiezel in serpula-turritella banken. De

Figuur 43. Ontwikkeling van een tauwbank in een serpulabank: Horizont van Kanne, profiel C3 op figs. 35, 61, Hinnisdael I (foto J. Frankie).

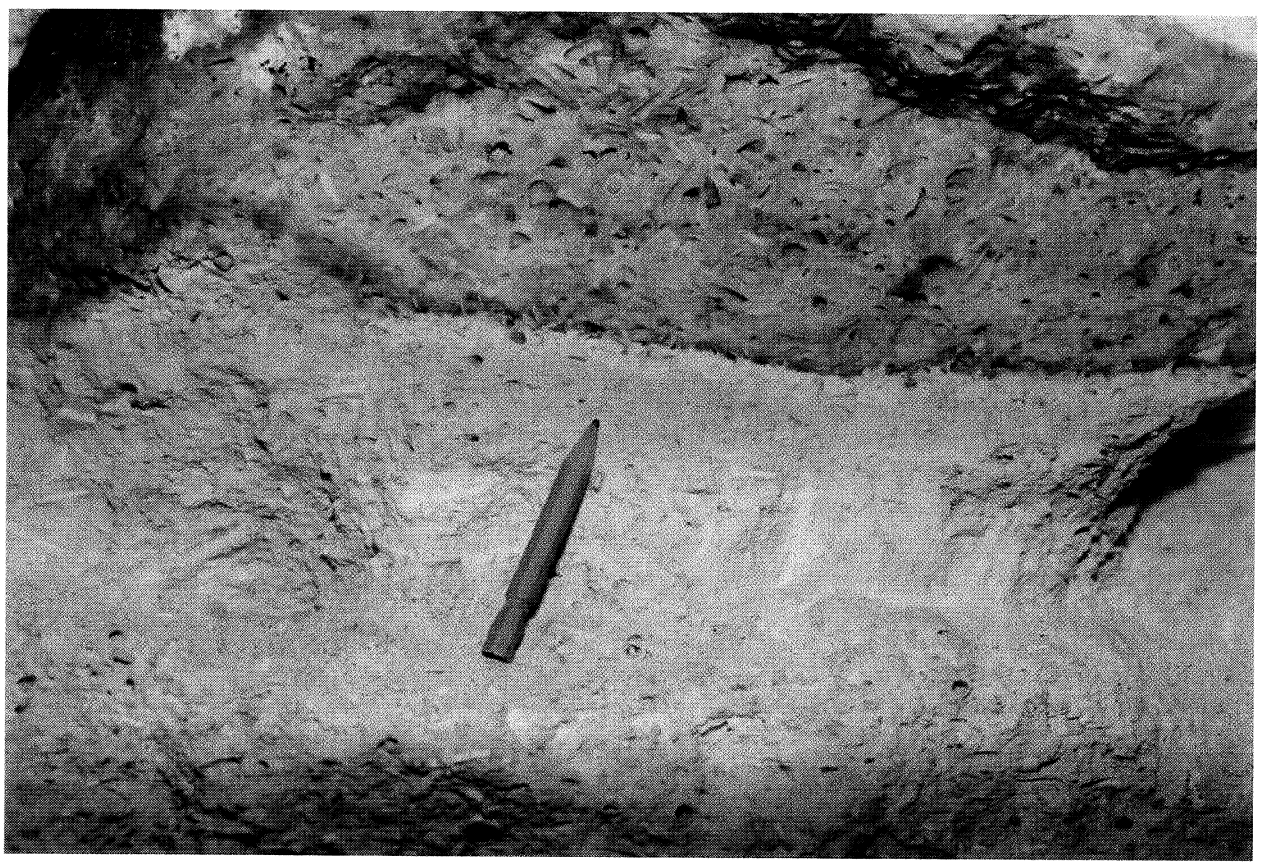
[35] De in het Jeker- en Maasdal (bijvoorbeeld te Eben-Emael) commercieel geëxploiteerde vuursteen komt uit de Kalksteen van Lanaye, het bovenste lid van de Formatie van Gulpen, en is dus ouder.



Figuur 44. Petrografische beschrijving van een slijpplaatje in het verkiezelingsfront van een tauwlaag ontwikkeld in de Horizont van Kanne (Hinnisdael II).
Tauw ('tawe' in het Waals, van de betekenis 'taai, moeilijk klievend) is een overgangsfacies tussen het zachte poreuze korrelkrijt en de harde vuursteen. Dit uit zich microscopisch in een geleidelijke toename van de mate van verkiezeling van het korrelkrijt (Dreesen, Dusar & Doperé, 2002; Dusar Dreesen, De Naeyer, 2003). Het kiezelzuur kristalliseert uit onder verschillende mineralogische variëteiten: opaal, microkwarts, macrokwarts en chalcedoon. De porositeit is secundair en wordt veroorzaakt door opgeloste fossielen.

meest opvallende tauwlagen in de grotten ontstaan in turritellabanken en bestaan voornamelijk uit de holtes nagelaten door deze fossielen. Vorm en volume van de holtes maken deze steen zeer bros en dit extreme, zij het zeer typische facies wordt dan ook niet als bouwsteen teruggevonden. Er komen ook overgangsvormen voor, bijvoorbeeld wanneer een tauwlaag gevormd wordt in een serpulabank en verticaal overgaat in een silexlaag ter hoogte van de begrenzende kalkareniet (Fig. 45).

Alhoewel beide vuursteenzones gelijktijdig kunnen ontstaan en ze op niet meer dan 2 m verticale afstand van elkaar gelegen zijn, kunnen ze toch duidelijk onderscheiden worden. Dit betekent dat de kiezelgel-oplossingen waaruit de vuursteen neergeslagen is slechts op beperkte wijze in het sediment konden migreren. De afwezigheid van superpositie in de vuursteenlagen wijst er ook op dat de initiële hoeveelheid kiezel beperkt was en dat laterale migratie hooguit op decimeterschaal gebeurde. Vuursteenvorming zal dus enkel gebeuren in lagen waar kiezelproducerende organismen zoals sponzen in voldoende concentratie voorkwamen. Dit zou volgens Zijlstra (1994) wijzen op een relatieve vertraging van de kalkproductie en dus lagere sedimentatiesnelheid, maar het kan omgekeerd ook te wijten zijn aan ongunstige leefomstandigheden voor de kiezelproducerende organis-



Figuur 45. Verkiezelingsfront in een tauwlaag. Detail van fig. 43 (foto J. Frankie).

men, bijv. door sterke opwarming van het water wanneer de zeediepte door opvulling van het bekken boven een kritische drempel is gekomen. Feit is dat de Leden van Nekum en Meerssen zowel in het minst diepe water zijn afgezet en het armst aan silex zijn van alle (tuf)krijtlagen van het Maastrichtiaan, een tendens die zich zal verder zetten in de Paleocene Formatie van Houthem.

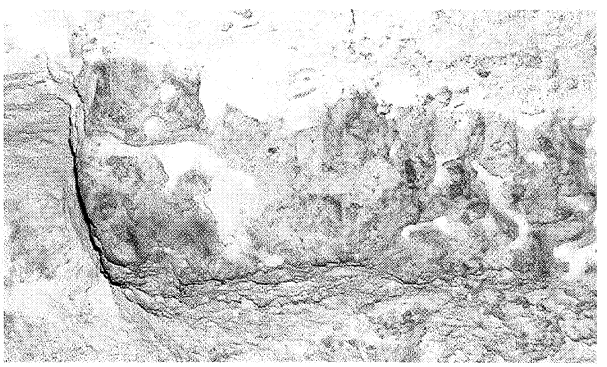
Zowel het facies[36] als de morfologie verschaffen informatie over het tijdstip waarop de vuursteenknollen en tauw in hun huidige vorm zijn versteend. Vorming van tauw komt na aragonietoplossing en voor rekristallisatie: schelpen oorspronkelijk in de vorm van aragoniet komen voor als holte. De plaatvormige vuursteen volgt diaklazen en kan dus niet vooraf ontstaan. Anderzijds werd in de Champignonskuil een diaklaas waargenomen die een broodvormige silexknol doormidden gespleten heeft, waarbij een omgekeerde tijdsrelatie bestaat. Deze waarnemingen wijzen op een zekere gelijktijdigheid van verkiezeling en diaklaasvorming. De diaklazen kunnen aangelegd zijn tijdens een korte tektonische puls terwijl de verkiezeling een meer langdurig proces was dat aangevangen was voor de vorming van diaklazen maar pas afgelopen nadien. De verkiezeling zou volgens deze hypothese kort na de afzetting van de Formatie van Houthem gebeurd zijn, onder ca. 40 m sedimentbedekking (10 m bovenste lagen van de Formatie van Maastricht en 30 m Formatie van Houthem).

6.3. Sedimentologie van de Kalksteen van Meerssen

De Kalksteen van Meerssen vertoont voornamelijk gemeenschappelijk lithologische kenmerken met de Kalksteen van Nekum. Beide behoren dan ook tot de Formatie van Maastricht. Toch zijn er voldoende verschillen om beide kalksteenpakketten van elkaar te onderscheiden, zowel door verschillende textuur van de kalkareniet als door het voorkomen van een grenslaag.

De *Hardground van Caster*[37] aan de basis van de Kalksteen van Meerssen is de meest markante en best herkenbare laag in Hinnisdael I, VI en de Waterkuil, waar de hardground fungeert als scheidingslaag in de exploitatie. Enkel in de Waterkuil zijn de Caster Hardground en de erop liggende lagen van de Kalksteen van Meerssen goed waarneembaar, deze laatste in het toegangsportaal tot in de holle weg boven de grot. De verdere beschrijving is dan ook op deze ontsluiting gebaseerd. Strikt genomen vormt de harground de top van de Kalksteen van Nekum en is de overdekkende fossielgruislaag de transgressieve basis van de Kalksteen van Meerssen. De hardground is echter doortrokken door graafgangen en grotere holtes die opgevuld zijn met sediment en fossielen uit de Kalksteen van Meerssen (Fig. 46). De graafgangen zijn vermoedelijk het werk van kreeftachtigen maar ook holtes nagelaten door boormossels komen veelvuldig voor. Turritella's, steenkernen en afdrukken van verschillende gastropodensoorten zoals *Haustator planus* (van Knippenberg, 1998) komen overvloedig voor. De wanden van de graafgangen, dikwijls oranjerood verkleurd, zijn vaak begroeid door bryozoa of vastgehechte grootforaminiferen. In andere formaties en onder andere omstandigheden zouden dergelijke graafgangen het centrum van verkiezeling en vuursteenvorming kunnen zijn. De Caster Hardground is erg ongelijk van vorm en dikte, al is de ware dikte moeilijk te bepalen omdat de overgang naar onder geleidelijk is. Door verwering steekt een bank echter voldoende duidelijk af tegen het nevengesteente (zie fig. 46). Deze is meestal 20 tot 40 cm dik, maar kan lokaal ook verdwijnen: uitgespoeld door erosie of volledig weggevreten door de koloniserende organismen. De verkitting is vroegdiagenetisch en vermoedelijk bevorderd door kalkafscheidende wieren, mogelijk ook door emersie boven het wateroppervlak met infiltratie van meteorisch (zoet) water.

Zo opvallend als de verharde en vaak verkarste Hardground van Caster in het dak van de ondergrondse galerijen zichtbaar is, zo moeilijk waarneembaar is hij in oppervlakkige ontsluitingen (of in de verweerde top van het Krijt onder oplossingsdolines zoals in Hinnisdael I). Hardgrounds zijn dan meestal te herkennen aan hun negatief reliëf, m.a.w. zij zijn meer verweerd dan de omgevende



Figuur 46. Caster Hardground doortrokken door graafgangen, Hinnisdael VII (Waterkuil)-(foto M. Dusar).

[36] Facies: uitzicht van een steen, zowel qua samenstellende korrels en versteningsgraad (lithofacies) als qua fossielinhoud (biofacies). Het facies is afhankelijk van paleogeografische verschillen of ecosysteemverschillen ten tijde van de sedimentatie of van vroegtijdige diagenese. Deze variaties kunnen optreden in gesteenten die gelijktijdig zijn ontstaan.

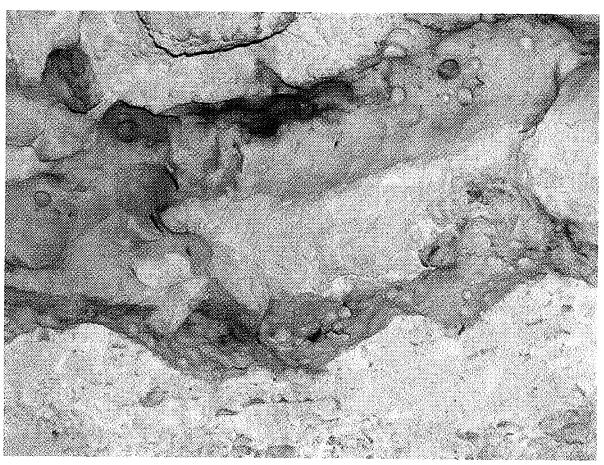
[37] De Hardground van Caster wordt overdekt door een transgressieve fossielgruislaag, Horizont van Caster genoemd. In de verdere tekst wordt enkel van Horizont van Caster gesproken wanneer specifiek deze fossielgruislaag wordt bedoeld. De opvallende gidslaag is de onderliggende hardground, die verder het meeste aandacht zal krijgen.

kalkarenieten. Deze paradox komt ook in het bouwsteengebruik terug. De Maastrichtersteen is de zachtste bouwsteen die ooit in België en nederland in gebruik is genomen en nochtans een van de meest duurzame. Dit komt omdat de ondergronds gemakkelijk verzandende kalkareniet bovengronds, door opeenvolgend bevochtigen en drogen, of ook door kalkoplossing binnenin de steen en kalkneerslag aan het oppervlak, een beschermende huid krijgt, 'calcin' genoemd. De hardgrounds daarentegen staan ondergronds in positief reliëf omdat ze harder zijn dan de fijne kalkareniet. Door de vroege verharding is echter de poriënverdeling ongelijkmatig met verstorend effect op de waterhuishouding zodat de stenen vorstgevoelig worden. Door vorst-dooi cycli zal de hardground uiteindelijk desintegreren en eroderen. Dit fenomeen is uiteraard alleen aan de oppervlakte vast te stellen, aangezien ondergronds een meer gelijkmatig klimaat heerst met positieve temperaturen (10-12°C).

De kalkarenietlagen die het gros van de Kalksteen van Meerssen opbouwen zijn meer gevarieerd in korrelgrootte dan in de Kalksteen van Nekum. Er komt een gedurige afwisseling voor tussen laagjes van grof en fijn kalkareniet, afgezet door een wisselende stroming tijdens stormen. De lagen zijn dan ook lensvormig en sterk wisselend in dikte. In de zeer grove kalkarenietlenzen zijn de bioklasten met het blote oog te herkennen. De Kalksteen van Meerssen wordt dan ook als het meest fossielrijke laagpakket van het Limburgse Krijt beschouwd. De grote fossielrijkdom heeft te maken met de geringe diepte van de zee. Afzettingen van fijne kalkareniet markeren periodes van kalm water en afzetting in een beschutte omgeving. De grove fossielgruislagen zijn het resultaat van erosie tijdens stormen en hersedimentatie na triëring volgens korrelgrootte. In een dergelijk ondiep milieu met weinig ruimte voor accumulatie van sedimenten en mogelijk kortstondige emersies gaat de zeebodem verdichten tijdens periodes van sedimentatiestilstand en rijk gekoloniseerde hardgrounds vormen. Brokstukken van hardgrounds, zowel kleine afgeronde klasten als metersgrote blokken met verstevigde wand en zwakgeconsolideerde kern, komen terecht in poelen tussen de hardgrounds en worden er gemicritiseerd of worden hernomen in de stormafzettingen die de hardgrounds overdekken, of zelfs geulvormig eroderen (Figs. 47-48).

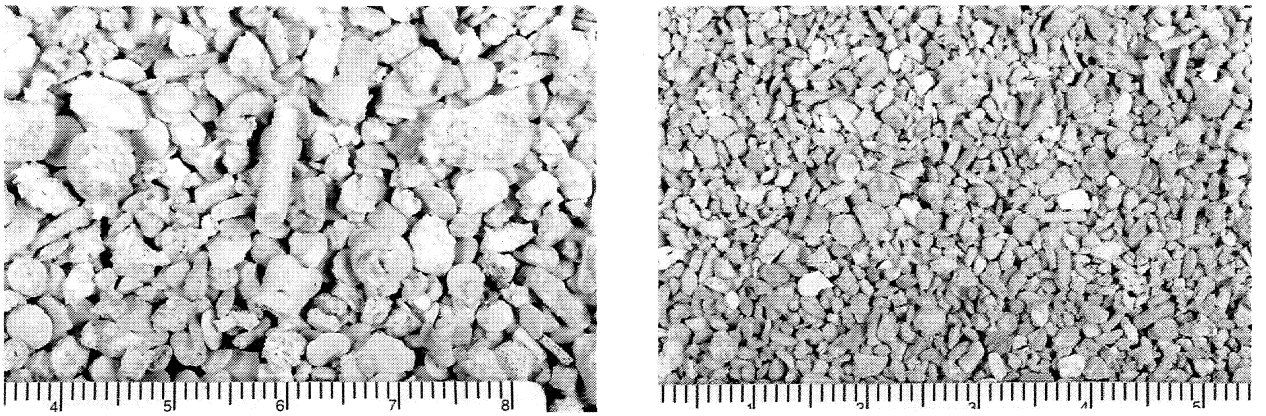
De dominantie van serpula's en grote echiniden *(Hemipneustes)* in de Kalksteen van Nekum maakt plaats voor bryozoa en grootforaminiferen of "nummulieten". Vooral aan de basis van de fossielgruislaag die bovenop of ingezakt in de Caster Hardground ligt zijn de grootforaminiferen talrijk. Identieke voorbeelden zijn in de St.-Pietersberg bij Maastricht beschreven: *Lepidorbitoides* en *Omphalocyclus* in Felder & Bosch (2000, foto 32 p. 91), of in Leloux (1998, plaat 4 p. 103)-(Fig. 49). Daarenboven werd ook een meer gevarieerde fauna gevonden met haaientanden, sponsen, verkalkte roodwieren (*Lithothamnium*), koralen, grote en gevarieerde schelpen (tot 15 cm, Fig. 50), ook echiniden en serpula's behorend tot andere soorten dan in de Kalksteen van Nekum, naast afgeronde fosfatische klasten en talrijke gemicritiseerde klasten omgezet door eencellige kalkwieren. Vroegdiagenetische verkitting in deze lagen, m.a.w. nieuwe hardgroundvorming, heeft ook merkwaardige bioturbaties door kreeftachtigen bewaard, steeds met calcietfasen in afwezigheid van SiO_2 (Figs. 51-52).

In het minder dan 4 m dik pakket Kalksteen van Meerssen, ontsloten bij de ingang van de Waterkuil komen boven de Horizont van Caster nog drie andere hardgrounds voor (Fig. 53). Zij zijn alle te herkennen aan een duidelijk begrensde bovenkant en vage onderkant die geleidelijk



Figuur 47. Getransporteerde blok hardground, gelegen tussen 1ste en 2de hardground niveau in de Kalksteen van Meerssen, 30x70 cm groot, met verharde wanden en geperforeerd door lithofagen, Waterkuil (foto M. Dusar).

Figuur 48. Grofkorrelige stormafzetting, bestaande uit bioklasten (echiniden, serpula, gastropoden) , roodwier-klasten en gerolde hardgroundfragmenten, tussen 1ste en 2de hardground niveau in de Kalksteen van Meerssen, Waterkuil (foto J. Verspreet).



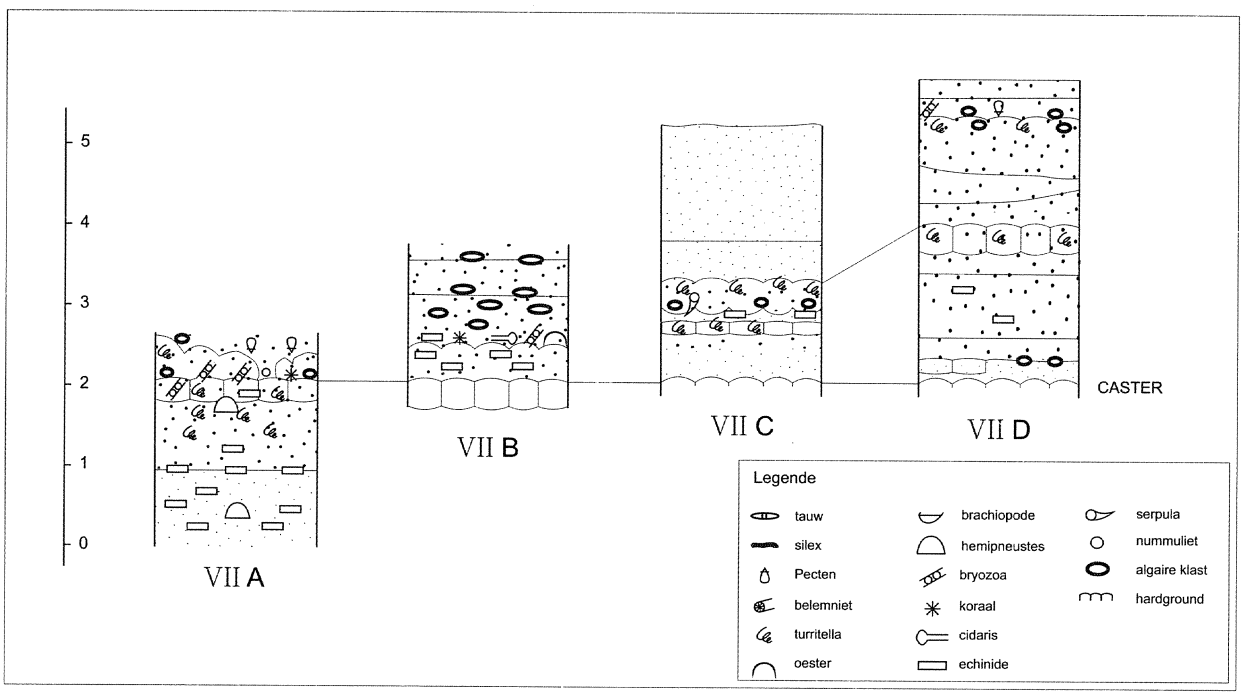
Figuur 49. Fossielgruis uit de basis van de kalksteen van Meerssen, in contact met de hardground, gedomineerd door grootforaminiferen (links fractie >2 mm met bryozoa en cidaris-stekel, rechts fractie 1-2 mm), Waterkuil, fig. 53 profiel A (foto's J. Herman).

overgaat in een gewoon kalkarenietfacies. Steenkernen van turritella's vormen een diagnostisch kenmerk om uit te maken of het al een hardground is. Opvallend is verder de aanwezigheid van *Lithothamnium* klasten, maar deze worden ook teruggevonden in de grove kalkareniet of fossielgruislaag die de hardground overdekt. De bovenste hardground, ontsloten aan de top van de verticale wand en ook nog in de holle weg boven de grot, wordt afgesloten door een fossielgruislaag rijk aan mooie, uitgeprepareerde bryozoa en schelpen.

De onderlinge afstand tussen de hardgrounds (gedefinieerd door hun top) varieert tussen 0,5 en 2 m. Dezelfde hardground kan op enkele meter afstand al een meter hoger liggen. De zeebodem moet dus heel onregelmatig geweest zijn maar ook ondiep en energetisch, biologisch zeer productief, met weinig sedimentatieruimte en dus veel afbraak en herwerking. Vooral boven de Caster Hardground stapelt het door stormen afgebroken en samengespoeld puin van vaak gemicritiseerde bioklasten zich op als een conglomeraat (Fig. 48).

Figuur 50. *Ctenoides? vogeli* Dhondt 1983 (cf. Dhondt, 1998), 15 cm grote schelp tussen grof fossielgruis, tussen 1ste en 2de hardground niveau in de Kalksteen van Meerssen, Waterkuil (foto D. De Roest).

Figuur 51. Tweede hardground in de Kalksteen van Meerssen met 'mijnwerkerskreeften' in het dak van de Waterkuil (foto D. De Roest).



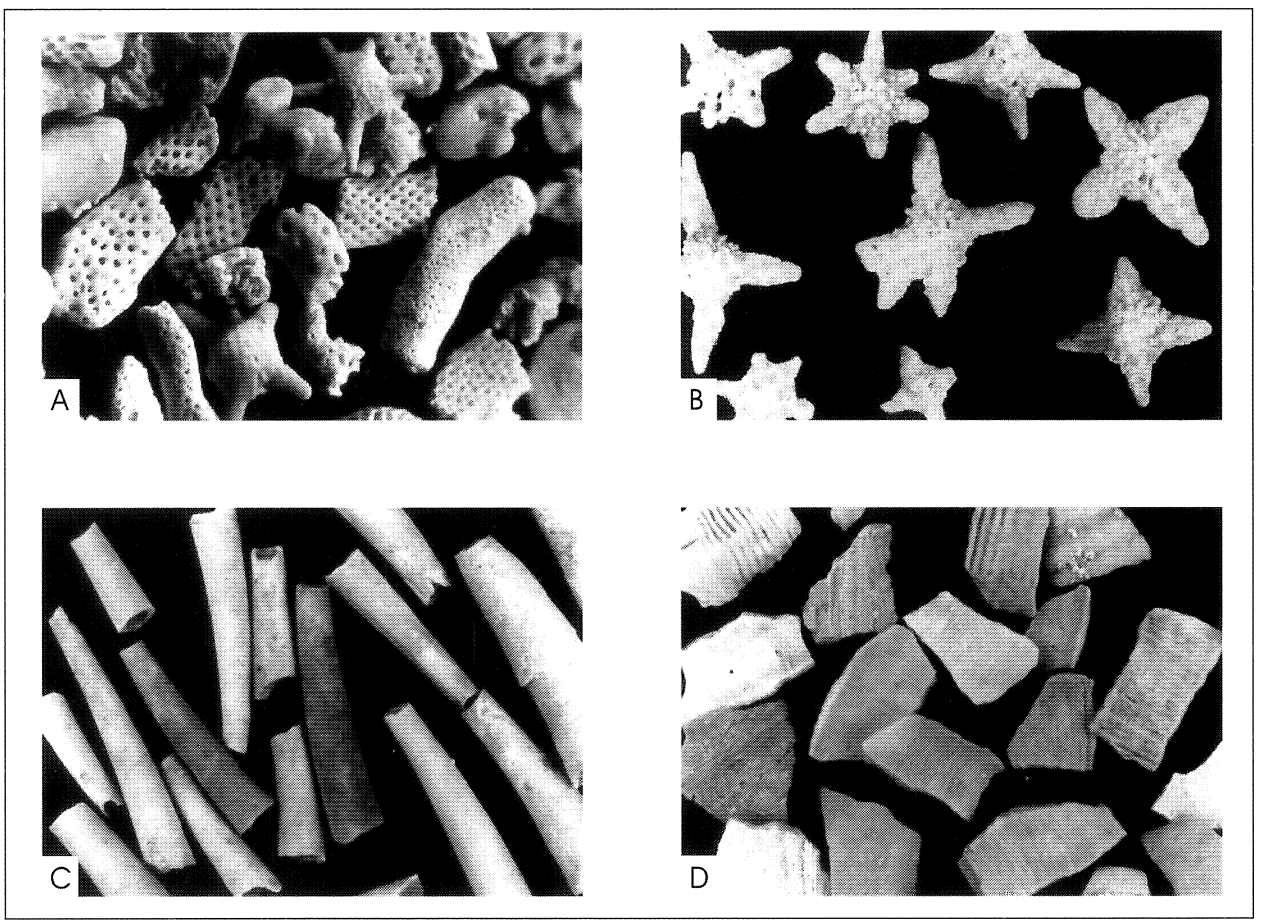
Figuur 53. Correlatieschema stratigrafische profielen in de Kalksteen van Meerssen. Lokalisatie: Waterkuil, zie fig. 64.

Figuur 52. Detail van fig. 51. Versteningen ontstaan rond ca 5 cm dikke ronde graafgangen van de 'mijnwerkers-kreeften' met rechtlijnige elkaar volgens scherpe hoeken snijdende horizontale gangen in verbinding met verticale graafgangen in de tweede hardground van de Kalksteen van Meerssen in de Waterkuil (foto L. Willems)-(cf. Felder & Bosch, 2000, fig. 7.1.5 p. 160-161).

6.4. Bioklasten – ecozonatie

6.4.1. Bioklastenonderzoek van monsters uit de mergelgrotten Hinnisdael I en Champignonskuil

Uit de mergelgrotten Hinnisdael I en Champignonskuil werden respectievelijk negen en vijf monsters onderzocht op bioklasten ('mesofossielen'[38]) voor het bepalen van de stratigrafische positie van de groeven. Tellingen van mesofossielen verschaffen informatie over de paleoecologische afzettingsvoorwaarden en het facies (Fig. 54). Dit afzettingsmilieu wordt beïnvloed door de factoren die



Figuur 54. Assemblagefoto bioklasten-types uit de Kalkstenen van Nekum en Meerssen van de St.-Pietersberg. A: bryozoa (en enkele forams); B: foraminiferen *(Calcarina calcitrapoides)*; C: serpula's *(Pyrgopolon mosae)*; D: fragmenten van serpula's (foto Sj. Felder).

[38] Mesofossielen zijn bioklasten groter dan de gemiddelde kalkzandkorrels maar kleiner dan de goed zichtbare macrofossielen die in het sediment voorkomen en er karakteristieke constituenten van zijn.

leiden tot veranderende lithologie en stratigrafie: klimaat, zeediepte, stroming, aanvoer van slib en voedingsstoffen. De zonatie op basis van bioklasten of 'ecozonatie' verloopt dus parallel aan de stratigrafische opeenvolging die op basis van lithologie of boorgatmetingen kan worden opgemaakt. Techniek en resultaten zijn reeds uitvoerig beschreven en algemeen toegepast in het krijt van Zuid-Limburg en noordoost België (Bless & Fernandez Narvaiza, 1994; Felder, 1981, 2001)

Onderzoek

De monsters werden gelijkmatig van de wanden droog afgeschraapt over een interval van 1 m (Hinnisdael I, geologisch profiel A) of 0,5 m (Champignonskuil, geologisch profiel A; stratigrafische positie van beide geologische profielen: fig. 35) tot een gewicht groter dan 0,5 kg. Vervolgens werden de monsters verbrijzeld tot de meeste korrels van elkaar gescheiden waren. Uit de gehomogeniseerde monsters werd een kleine hoeveelheid materiaal afgezeefd op zeven van 2.4 mm en 1 mm doorsnede. De zeefrest 1-2.4 mm werd daarna gewassen en gedroogd en de bioklasten uitgelezen met behulp van een binoculair. De verkregen resultaten zijn weergegeven in tabellen van de getelde aantallen en in percentages daarvan (Tabellen 7-10).

Monster	0-1m	1-2m	2-3m	3-4m	4-5 m	5-6m	6-7 m	7-8m	8-8.75m
Forams	1					1		1	15
Bryozoa	16	20	9	5	3	5	20	27	84
Echinoids	48	74	44	36	38	8	104	133	15
div. Ech.	3	1	18	12	6	15	4		2
Ophiur.	2								
Asteroids.									
Crinoids	2			3			2	9	1
Pelecyp.	7	5	14	5	7	8	8	26	4
Brachiop.	1								
Serpulids	16	28	48	78	75	84	12	4	
Decapods		3	25	3					1
Belemno.					2				
Totaal	*96*	*131*	*158*	*142*	*131*	*121*	*150*	*200*	*122*

Tabel 7. Hinnisdael I, bioklasten (mesofossielen) in zeefmaat 1-2.4 mm, getelde aantallen van de bioklastengroepen. Bemonstering van geologisch profiel Hinnisdael I A, meter-intervallen van onder naar boven (Fig. 61 voor lokalisatie en Fig. 35 voor stratigrafisch profiel).

Monster	0-1m	1-2m	2-3m	3-4m	4-5 m	5-6m	6-7 m	7-8m	8-8.75m
Forams	1,04					0,83		0,50	12,30
Bryozoa	16,67	15,27	5,70	3,52	2,29	4,13	13,30	13,50	68,85
Echinoids	50	56,49	27,85	25,35	29,01	6,61	69,33	66,50	12,30
div. Ech.	3,13	0,76	11,39	8,45	6	12,40	2,67		1,64
Ophiur.	2.06								
Asteroids.									
Crinoids	2,06			2,11			1,33	4,50	0,62
Pelecyp.	7,29	3,82	8,86	3,52	5,34	6,61	5,33	13,00	3,28
Brachiop.	1.04								
Serpulids	16,67	21,37	30,38	54,93	57,25	69,42	8,00	2,00	
Decapods		2,29	15,82	2,11					0,82
Belemno.					1,53				
Totaal	*100*	*100*	*100*	*100*	*100*	*100*	*100*	*100*	*100*

Tabel 8. Hinnisdael I, bioklasten (mesofossielen) in zeefmaat 1-2.4 mm, percentages van de bioklastengroepen. Bemonstering van geologisch profiel Hinnisdael I A, meter-intervallen van onder naar boven (Fig. 61 voor lokalisatie en Fig. 35 voor stratigrafisch profiel).

Monster	0,0 – 0,50m	0,50 – 1,00m	1,00 – 1,50m	1,50 – 2,00m	2,00 – 2,40m
Foraminifera				2	1
Bryozoa	8	10	6	15	12
Echinoidea	36	64	64	76	79
div. Echin.	24		6		4
Ophiuridea.					
Asteroidea.					2
Crinoidea				2	4
Pelecypoda		7	3	20	9
Brachiopoda.	3			3	
Serpulidae	52	102	117	67	
Decapoda	9	2		2	2
Belemnoidae					
Cirripedia	1				
Totaal	*133*	*185*	*196*	*187*	*113*

Tabel 9. Champignonskuil, bioklasten (mesofossielen) in zeefmaat 1-2.4 mm, getelde aantallen van de bioklastengroepen. Bemonstering van geologisch profiel Champignonskuil A, halve-meter-intervallen van onder naar boven (Fig62 voor lokalisatie en Fig. 35 voor stratigrafisch profiel).

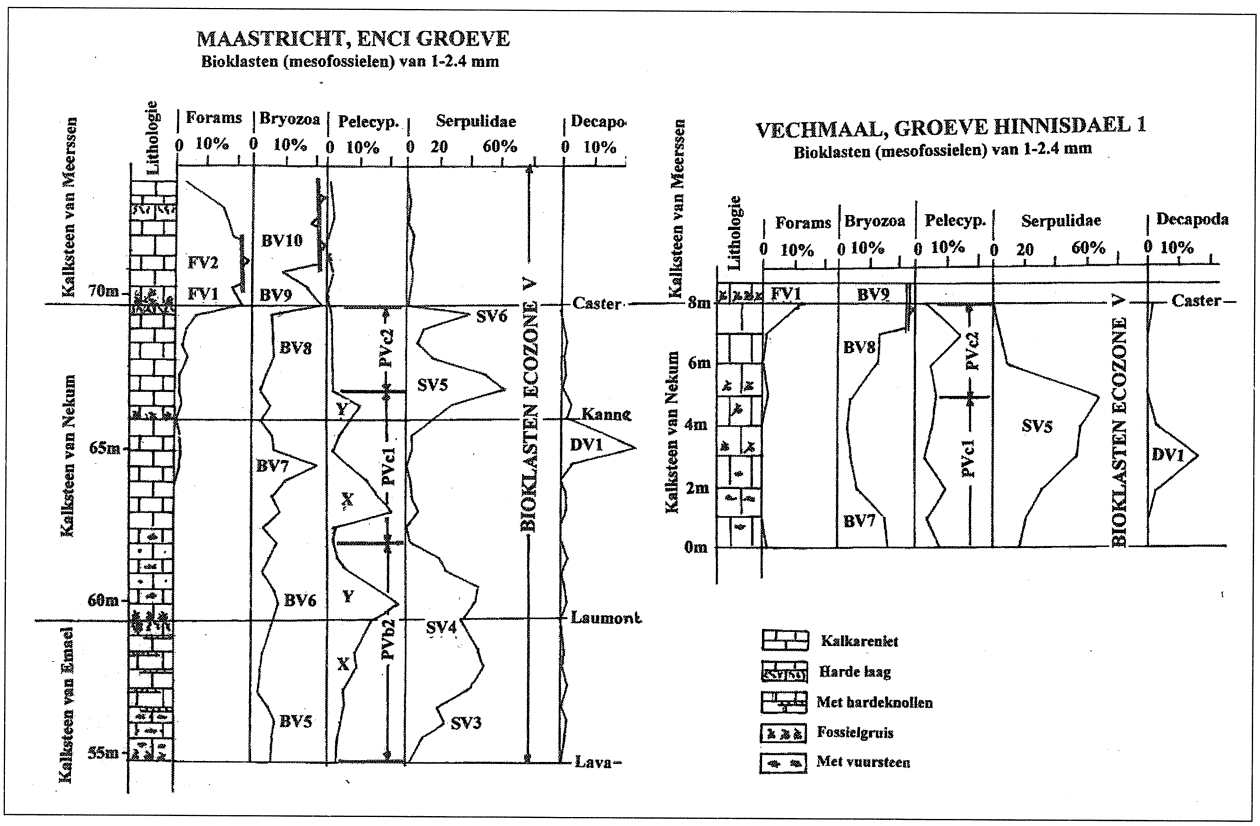
Monster	0,00 – 0,50m	0,50 – 1,00m	1,00 – 1,50m	1,50 – 2,00m	2,00 – 2,40m
Foraminifera				1,07	0,88
Bryozoa	6,02	5,41	3,06	8,02	10,62
Echinoidea	27,07	34,59	32,65	40,64	69,91
div. Echin.	18,05		3,06		3,54
Ophiuridea.					
Asteroidea.					1,77
Crinoidea				1,07	3,64
Pelecypoda		3,78	1,53	10,70	7,96
Brachiopoda.	2,26			1,60	
Serpulidae	39,10	55,14	59,69	35,83	
Decapoda	6,77	1,06		1,07	1,77
Belemnoidae					
Cirripedia	0,75				
Totaal	*100*	*1*	*100*	*100*	*100*

Tabel 10. Champignonskuil, bioklasten (mesofossielen) in zeefmaat 1-2.4 mm, percentages van de bioklastengroepen. Bemonstering van geologisch profiel Champignonskuil A, halve-meter-intervallen van onder naar boven (Fig. 62 voor lokalisatie en Fig. 35 voor stratigrafisch profiel).

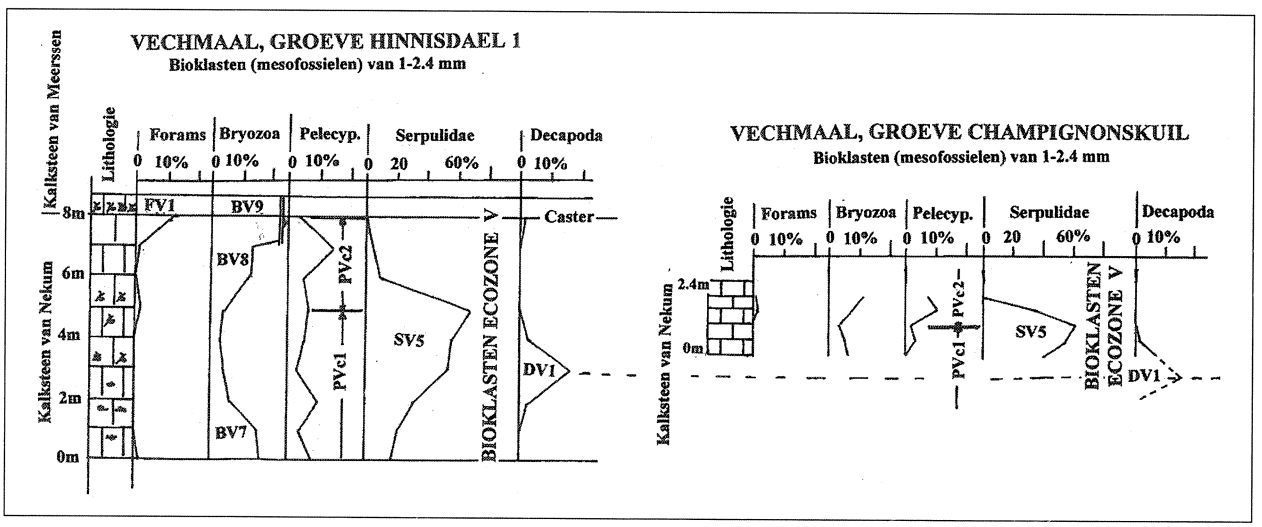
Interpretatie

De gevonden samenstelling van de bioklasten, in de kleine onderzochte hoeveelheid van de monsters, was zodanig dat verder onderzoek van de genomen monsters niet nodig bleek. Om de verkregen gegevens nauwkeurig te vergelijken werden diagrammen samengesteld van de gevonden percentages (Figs. 55-56) die vergeleken konden worden met een soortgelijk diagram van het stratotype uit de ENCI groeve te Maastricht.

De samenstelling, waarbij relatief hoge percentages van Bryozoa, Serpulidae en plaatselijk Decapoda aangetroffen werden, wijst op de bioklastenecozone V en in het bijzonder de Decapoda op deelecozone Vc (Felder, 2001). Deze deelecozone Vc is gelegen in de Kalksteen van Nekum uit de Formatie van Maastricht. De basis van dit lid, tevens de top van de Kalksteen van Emael, de Horizont van Laumont, werd echter niet bereikt.



Figuur 55. Vergelijking ecozonatie Hinnisdael I met typeprofiel in de ENCI groeve te Maastricht.



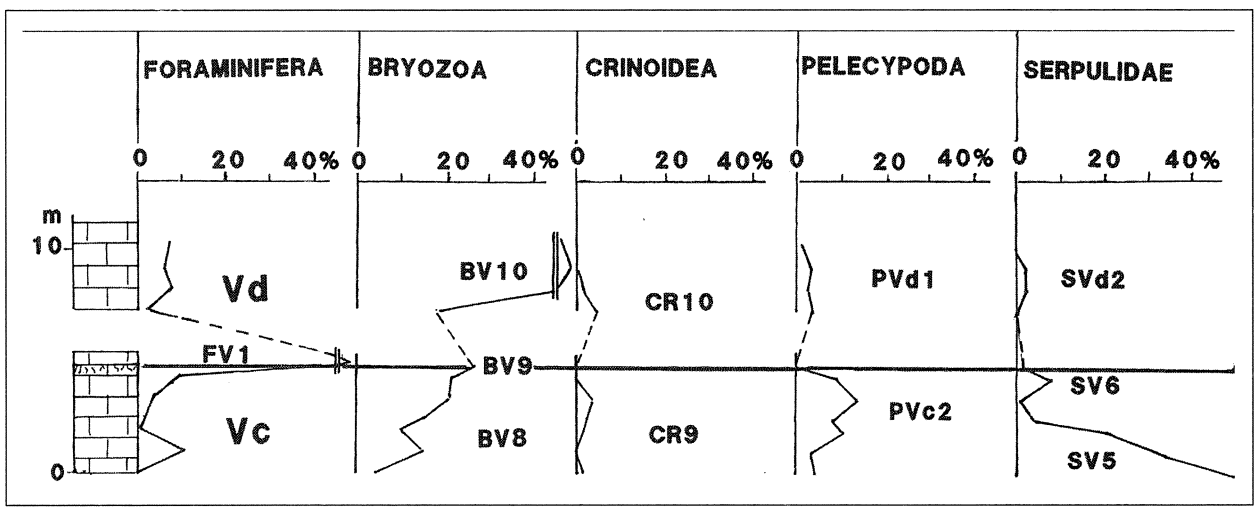
Figuur 56. Vergelijking ecozonatie Champignonskuil met Hinnisdael I.

De relatief hoge percentages Foraminifera (piek FV1) en Bryozoa (piek BV9) in het monster van 8,00 – 8,75 m in de groeve Hinnisdael I, wijst erop dat dit monster genomen is in deelecozone Vd, dus in de Horizont van Caster aan de basis van de Kalksteen van Meerssen uit de Formatie van Maastricht[39].
Het aantreffen van meerdere Decapodaresten in het monster van 0,00 – 0,50 m in de groeve Champignonskuil (piek DV1) en de Serpulidaepiek SV5 wijst eveneens op deelecozone Vc, dus de Kalksteen van Nekum. Geen van de monsters uit deze groeve bevatte aanwijzingen over de Horizont van Caster.
De fossielinhoud bevestigt dus de interpretatie die reeds op basis van lithologie en exploitatiemethode kon worden gemaakt[40].

6.4.2. Bioklastenonderzoek van monsters uit Hinnisdael VII (Waterkuil)

In het kader van het onderzoek van zee-egelfossielen door de Werkgroep Vuursteeneluvium (cf. Indeherberge et al., 1996) werd deze groeve reeds in 1999 bemonsterd. De cijferlijsten van dit onderzoek zijn niet meer voorhanden, maar wel het diagram van de bioklasten, gepubliceerd als fig. 53 in Felder, 2001. Verder zijn een aantal waarnemingen tijdens de bemonstering van 1999 in het rapportboek bewaard gebleven evenals het diagram van de bioklasten (Figuur 57, overeenkomend met fig. 53 in Felder, 2001). Tijdens het bezoek aan de groeve werd onmiddellijk vastgesteld dat het tufkrijt bij de ingang van deze groeve kalkstenen behoorde tot de Kalksteen van Meerssen. In de tweede pilaar links van de hoofdgang in de groeve werd een breuk waargenomen (verder beschreven in hoofdstuk tektoniek). Achter de breuk was een Hardground (harde laag) aanwezig die bedekt werd met fossielgruis. Onder deze harde laag waren kalkstenen aanwezig die nog tot de Kalksteen van Nekum behoorden. Verder in de grot bleek in deze kalkstenen een opeenhoping van zee-egelfragmenten (van *Hemipneustes striatoradiatus*) aanwezig te zijn. Dergelijke opeenhopingen van zee-egelfragmenten in de Kalksteen van Nekum worden het "*Hemipneustes*-niveau" genoemd. De Horizont van Kanne ligt dieper en wordt in deze grot nergens bereikt, in tegenstelling met alle andere grotten rond de Mergelkuilen (zie vergelijking met de typelokaliteit). Ook de bioklasten bieden geen oplossing omdat de fragmenten meestal groter zijn dan 2.4 mm en dus ontbreken in de zeefmonsters van 1-2.4 mm.

Indertijd werd begonnen met het nemen van monsters in de groeve, achter de breuk daar waar de Hardground zichtbaar was. Er werden op deze plaats, overeenkomend met het geologische profiel Hinnisdael VII A (Fig. 53), een vijftal monsters genomen. Te beginnen bij de vloer van de groeve = 2,50 m onder de Hardground. Monster 1 = 0,00 – 0.50 m, monster 2 = 0,50 – 1,50 m, monster 3 = 1,50 – 2,50 m., monster 4 = 2,50 – 2,90 m (= de Hardground) en monster 5 = 2,90 – 3,40 m.
Later werden ook een viertal opeenvolgende monsters genomen bij de ingang van de groeve (geologisch profiel



Figuur 57. Ecozonatie Waterkuil, overgang Kalksteen van Nekum – Meerssen (overgenomen fig 53 uit Felder, 2001).

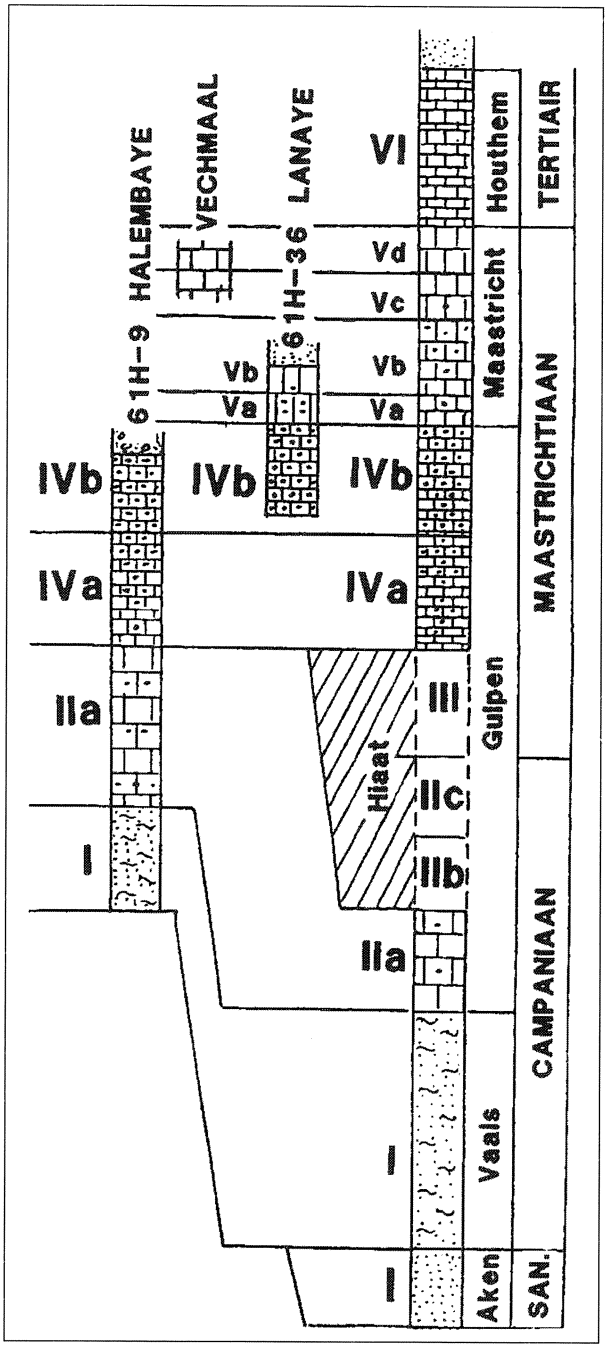
[39] De top van dit profiel is gelokaliseerd in een instortingszone. Het profiel gaat dus door de volledige Krijtsequentie heen, inclusief de lagen die boven het dak van de grotten liggen, dus boven de onderkant van de Caster Hardground.

[40] De macrofossielen die in de grotwanden zichtbaar zijn leveren fragmenten die groter zijn dan de maximale cut-off van de onderzochte bioklasten (2,4 mm) en komen dus niet noodzakelijk voor in het beeld dat hier geschapen wordt. De stelselmatig hoge aantallen echiniden en de sporadisch hoge aantallen serpuliden tussen de getelde bioklasten maken echter duidelijk dat er toch wel een relatie bestaat.

Hinnisdael VII B, fig. 53). Ook hier werd begonnen bij de vloer ter plaatse. Monster 1 = 0,00 – 0,50 m, monster 2 = 1.00 – 2,00 m, monster 3= 2,00 – 3,00 m en monster 4 = 3,00- 4,00 m.
De resultaten van het onderzoek van deze monsters (Fig. 57) konden stratigrafisch ingepast worden.
De eerste monsterserie genomen achter de breuk werd gedetermineerd als ecozone Vc (top Kalksteen van Nekum) met de Serpulidenpieken SV5 en SV6 en de Bryozoapiek BV8. De top van de aangetroffen Hardground van 2,50 – 2,90 m vormt de basis van de Horizont van Caster met daarop liggend een fossielgruislaag met de Foraminiferapiek FV1 en de Bryozoapiek BV9.
De tweede serie monsters bleken tot ecozone Vd (Kalksteen van Meerssen) te behoren. Mogelijk ontbreekt aan de basis van deze monsters nog iets van de Kalksteen van Meerssen dat niet bemonsterd werd, daarom is in de grafiek iets ruimte open gelaten tussen de monsterseries. Gezien het zeer hoge percentage Bryozoa (piek BV10) kan dat echter geen groot hiaat zijn, zoals bevestigd door de lithologische correlatie tussen geologische profielen A en B (Fig. 53).

Samenvattend toont de ecozonatie op basis van bioklasten aan dat zowel de Kalksteen van Nekum als de Kalksteen van Meerssen voorkomen in deze grot, door de aanwezigheid van ecozones Vc (Nekum) en Vd (Meerssen)-(Fig. 58). De aangehaalde ecostratigrafische indeling en piekherkenning in de bioklastenpopulatie volgen uit correlatie met de typeprofielen ENCI (St.-Pietersberg Maastricht) en groeve Curfs (tegenwoordig bekend als groeve Ankerpoort) te Geulhem (Nederlands Zuid-Limburg). De foraminiferenpiek in de Horizont van Caster, aan de basis van de Kalksteen van Meerssen kan goed waargenomen worden, evenals een reeks doorheen de grens Nekum-Meerssen oplopende bryozoapieken en, enigzins tegengesteld aan de aantallen bryozoën, de grote hoeveelheid serpuliden of kalkkokerwormen in de Kalksteen van Nekum.

De overgang tussen beide leden van de Formatie van Maastricht, met de Horizont van Caster als grenslaag, is goed ontsloten in deze grot, ondanks de complicatie door de aanwezigheid van een breuk die dwars door de observatiezone loopt. De top van Meerssen en de basis van Nekum kunnen niet waargenomen worden, enerzijds omdat de toplagen van het krijt door erosie verdwenen zijn en anderzijds omdat de dieperliggende lagen onder de watertafel vallen en niet in exploitatie zijn genomen. Stratigrafisch wijkt de Waterkuil dus licht af van de grotten gelegen rond de depressie van de Mergelkuilen van Hinnisdael die alle beperkt zijn tot de Kalksteen van Nekum (weliswaar met zicht op de grenslaag van Caster in de hoogste instortingstrechters of in de rotswanden boven de grotingang). Mergelgrotten in de Kalksteen van Meerssen zijn zeldzaam. De gewijzigde bioklasteninhoud gaat immers samen met een meer wisselende



Figuur 58. Stratigrafische positie volgens de ecozonatie van de ontsluitingen te Vechmaal in vergelijking met de typelokaliteiten (uittreksel fig. 27 in Felder, 2001).

korrelgrootte van de kalkarenietfractie en sterkere verschillen in cementatie, wat een negatieve weerslag heeft op exploitatietechniek en gebruik van de mergelsteen.

6.5. Vergelijking met de typelokaliteit

6.5.1. Lid van Nekum

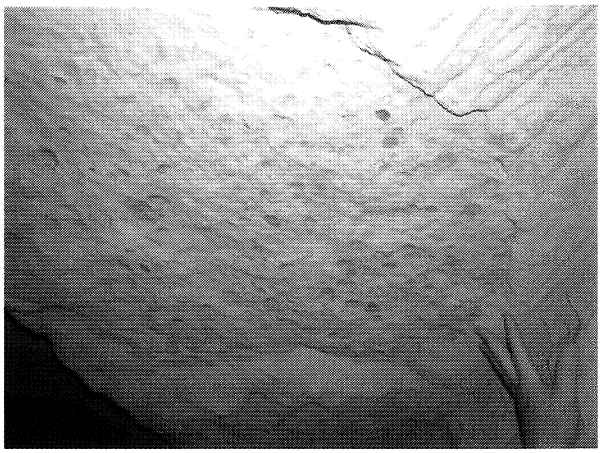
De 'Kalksteen van Nekum' is oorspronkelijk beschreven in de St.-Pietersberg bij Maastricht als een lid van de

Formatie van Maastricht (Felder & Bosch, 1998a-b; Felder & Bosch, 2000; Fig. 30). Door vergelijking van de in Vechmaal opgenomen, onderling gecorreleerde profielen met het lithologisch typeprofiel van de St.-Pietersberg kunnen gelijkenissen en verschillen in dikte- en faciesontwikkeling vastgesteld worden. De dikte blijft gelijk, ongeveer 10 m. De samenstelling, tufkrijt met fossielgruislagen en beperkte voorkomens van vuursteen, en de aard van de fossielen komen eveneens duidelijk overeen: ecosysteem, waterdiepte en subsidentieregime waren gelijkvormig over de regio ten tijde van de afzetting van de Kalksteen van Nekum.

De basislagen van de Kalksteen van Nekum, in de typelokaliteit bestaande uit 1,50 m harde banken met fossielgruislagen, zijn in Vechmaal niet ontsloten. Het resterende deel van de Kalksteen van Nekum kan waargenomen worden waar de hoogte van de galerijen minstens 7 m bedraagt, wat het geval is in grote delen van Hinnisdael I en V.

Het hieropvolgend zacht tufkrijt met onregelmatige vuurstenen en fossielgruislensjes vormt het basispakket dat slechts in enkele zones in de grotten over een dikte van 3 m ontsloten is. Een laagvormige concentratie van vuursteen, zoals vermeld in het typeprofiel (Felder & Bosch, 2000, fig. 3-48 p. 87), werd niet in Hinnisdael I maar wel in Hinnisdael V aangetroffen (zie fig. 41). Het vuursteengehalte vertoont behoorlijke variaties tussen de verschillende profielen, maar blijft beperkt tot max. 5%. Dit onderste vuursteenniveau wordt steeds afgesloten door een fossielgruislaag met gevarieerde samenstelling, van oester-serpula-turritella tot serpula-zee-egel. Dit fossielgruisniveau wordt niet vermeld in het typeprofiel.

Het tufkrijt boven dit fossielgruisniveau werd als bouwsteen geëxploiteerd, vandaar dat het onderliggend pakket niet overal afgegraven werd. Het vangt aan met een 2 m dik pakket bekend als het '*Hemipneustes* niveau' omwille van het talrijk voorkomen van grote complete zee-egels behorend tot de soort *Hemipneustes striatoradiatus* (Fig. 34). Dit pakket is algemeen rijk aan fossielen waaronder voornamelijk brokstukken van dezelfde zeëgelsoort, en gruislagen en –lenzen met dezelfde gevarieerde samenstelling die ook de onderliggende eenheden kenmerkte, waaronder serpula-turritella associaties opvallen. Het komt goed overeen in dikte en facies met de typelokaliteit.
Dit pakket wordt in de typelokaliteit afgesloten door de '**Horizont van Kanne**', een nieuwe fossielgruislaag. Ook in Vechmaal komt een fossielgruislaag voor met dezelfde fauna-associaties die ook in de fossielgruislaag aan de basis van de zee-egelbank voorkwamen, zonder de uitgesproken dominantie van echiniden die voor de typelokaliteit vermeld wordt. Dit niveau kan in Vechmaal ook als gidshorizont gebruikt worden, ondanks het feit dat ter hoogte van deze horizont een grote concentratie



Figuur 59. Pectenlaag in het dak van de Horizont van Kanne; Hinnisdael II (foto L. Willems).

lensvormige, afgeknotte of opsplitsende fossielgruislagen voorkomt. In de Champignonskuil komt zo 0,5 tot 1 m boven de Horizont van Kanne in het dak van een aantal galerijen een zeer grove fossielgruislaag voor (Fig. 36) met een zeer gevarieerde fauna waarin verschillende niveaus vol roodverweerde ontkalkte pectiniden opvallen (Fig. 59). Fossielgruislagen, inclusief de Horizont van Kanne, zijn uitgesproken lensvormig (Fig. 37). De correlatie van de Horizont van Kanne tussen Vechmaal en Maastricht is in feite een correlatie van de band waarbinnen deze fossielgruislaag tot ontwikkeling komt. Het is derhalve niet zeker dat de Horizont van Kanne een gelijke tijdslijn voorstelt of als een continue laag tussen Vechmaal en Maastricht gevormd is, maar integendeel qua uitzicht beïnvloed wordt door de wisselende staat van de zeebodem.

In tegenstelling met de typelokaliteit komt onder en in deze Horizont van Kanne nog een tweede vuursteenniveau voor, met knollen in de vorm van grote platte broden (Fig. 19 bovenaan), die soms tot in de fossielgruislagen doordringen en dan als tauw ontwikkeld zijn (Fig. 43). Door de sterke lensvormige ontwikkeling van dit niveau is het goed mogelijk dat de vuursteenbanken toevallig afwezig zijn in de typelokaliteit, zoals ze dat ook zijn in belangrijke zones van de grotten te Vechmaal.

Boven de Horizont van Kanne volgt nog een tufkrijtpakket van 3 m dikte tot aan de 'Horizont van Caster', de basis van de kalksteen van Meerssen. De dikte-ontwikkeling blijft voor het gehele pakket Kalksteen van Nekum gelijklopend met de typelokaliteit. Dit bovenste pakket in de Kalksteen van Nekum is minder fossielrijk dan de zone rond de Horizont van Kanne, maar er is wel een tendens tot dominantie van echinidenresten. Ook in dit pakket komen complete *Hemipneustes*-schalen voor, niet vermeld voor de typelokaliteit.

6.5.2. Lid van Meerssen

De 'Kalksteen van Meerssen' is oorspronkelijk beschreven in de groeve Curfs bij Geulhem (Felder & Bosch, 2000) en in de ENCI groeve, het typeprofiel van het Maastrichtiaan in de St.-Pietersberg bij Maastricht volgens de oorspronkelijke definitie van André Dumont (Felder & Bosch, 1998a-b; fig. 30). In Vechmaal is de Kalksteen van Meerssen onvolledig, afgesneden door een erosief contact met de Formatie van St.-Huibrechts-Hern, Horizont van Ravensbosch genoemd (Felder & Bosch, 1998a). Ondanks het erosief contact bevat het overliggend tongeriaanzand geen basisgrind met elementen geërodeerd uit het onderliggend tufkrijt (verbrokkelde lenzen Gelinden Mergel kunnen wel voorkomen maar dit is het gevolg van karstoplossing na de afzetting van het Krijt). Oudere horizonten zoals Berg-en-Terblijt (K/T grens in top Meerssen Kalksteen) en Vroenhoven (grens Lid van Meerssen van de Formatie van Maastricht en Formatie van Houthem en dus de K/T grens met een groter hiaat voorstellend dan waar de sequentie boven de Horizont van Berg-en-Terblijt voorkomt) zijn dus niet (meer) aanwezig.

Meest kenmerkend voor Vechmaal zijn vier hardgrounds (Fig. 53). De onderste en meest opvallende, de **Hardground van Caster** (Fig. 60), vormt de grens met de Kalksteen van Nekum. Op de hardground en in uitholllingen ligt een opstapeling van fossielen en klasten. Ook in Vechmaal vallen hierin de grootforaminiferen op (Fig. 49). Deze fossielgruislaag vormt een echte bank en is duidelijk dikker ontwikkeld dan de onderliggende fossielgruislagen in de Kalksteen van Nekum. De Horizont van Caster vormt de absolute top van de tufkrijtlagen rond de Mergelkuilen van Hinnisdael, terwijl ze in de Waterkuil eerder de basis van de sequentie uitmaakt. Het is mogelijk dat deze basishorizont (of alleszins de fossielgruislaag) zich lokaal dieper insnijdt en het tufkrijtpakket boven de Horizont van Kanne gedeelelijk uitwigt, wat mogelijk in de Champignonskuil kan gebeurd zijn.

Figuur 60. Caster Hardground in de Waterkuil, met scherp, onregelmatig bovencontact in sterkhellende doorsnede (donkergrijze verkleuring) en vagere overgang naar onder (ter hoogte van de hamer). In de grofkorrelige fossielgruisbank op de hardground komen meerdere losgerukte, afgeronde hardgroundklasten van wisselende grootte voor. De bruine verkleuring van de wand onderaan is te wijten aan schommelingen in het grondwaterpeil (foto M. Dusar).

Tussen de Horizont van Caster en de Horizont van Berg-en-Terblijt, die enkel in het gebied van de groeve Curfs bewaard is gebleven en dus voor de omgeving van Vechmaal niet meetelt, komen in de Kalksteen van Meerssen 4 (groeve Curfs) of 5 (groeve ENCI) hardgrounds voor, met onderlinge afstanden van 0,50 m tot meer dan 2 m (Felder & Bosch, 1998a, 2000). In de praktijk laat deze hardgroundsequentie een tweedeling van de Kalksteen van Meerssen toe, een onderste deel met deze hardgrounds en een bovenste deel met kalkareniet (waarbij in Geulhem nog de sequentie boven de Berg-en-Terblijt Horizont komt). In de Waterkuil is enkel dit onderste deel ontsloten.
De fossielgruislagen die deze hardgrounds overdekken vallen op door hun rijkdom aan bryozoën en werden daarom wel eens de bryozoënlagen genoemd. Dit is in Vechmaal niet anders. Met name de bovenste fossielgruislaag bevat vertakte, losgestapelde bryozoa die zich gemakkelijk laten uitprepareren.

De drie hardgrounds die in de Kalksteen van Meerssen aan de ingang van de Waterkuil voorkomen (zie fig. 51) kunnen ondanks het sterk lensormig karakter van de afzetting gecorreleerd worden met het typeprofiel in de groeve Curfs en met de St.-Pietersberg, uitgaande van de hypothese dat hun voorkomen (sedimentatiestilstand) een extern geforceerde cycliciteit weergeeft. Dit zou betekenen dat in de Waterkuil de cycli IVf-1 tot IVf-4 aanwezig zijn (Felder & Bosch, 1998a)[41]. De dikte-ontwikkeling loopt wel uiteen. In Vechmaal ligt de derde hardground op 3,25 m boven Caster, in groeve Curfs is deze afstand 4,40 m (Felder & Bosch, 2000) en in de ENCI groeve op de St.-Pietersberg bijna 6 m (Felder & Bosch, 1998a). Betekent dit een systematische verdunning in vergelijking met de typelokaliteiten? Niet noodzakelijk: in het profiel van de Waterkuil wordt het tufkrijt rechtstreeks door de Quartaire leem overdekt en is het hiaat, en dus ook de onzekerheid over de totale dikte-ontwikkeling zeer groot. In noordelijke richting, naar Vechmaal dorp toe, neemt de dikte van de Kalksteen van Meerssen onder de erosieve top snel toe: in peilput 106E 765 (zie hoofdstuk grondwater) bedraagt de dikte van het Lid van Meerssen reeds 9,5 m. Vermoedelijk

[41] IV staat voor vierde formatie in het Krijt van Zuid-Limburg (Formatie van Maastricht), f voor zesde lid in deze formatie (Lid van Meerssen), de nummering op de opeenvolgende cycli die aan hun basis door een hardground begrensd zijn.

is hiermee cyclus IVf-6 van het ENCI profiel bereikt, waarvan de basis aldaar 9 m boven Caster ligt en de erosieve top 13 m boven Caster. In de groeve Curfs bedraagt de dikte van de Kalksteen van Meerssen, cyclus boven de Horizont van Berg-en-Terblijt niet meegerekend, 12 m. Indien er al dikteverlies optreedt is dit niet meer dan 10 à 20%. De geringere dikte tussen de onderste hardgrounds in de Waterkuil lijkt dus gecompenseerd te worden in het bovenste deel van de Meerssen sequentie.

7. Tektoniek

7.1. Helling van de Krijtlagen

De regionale vervormingsgeschiedenis uit zich in de structurele positie en helling van de lagen en in het voorkomen van breuken en diaklazen. Verticale bodembewegingen te wijten aan tektonische inversie en relaxatie van het koppel Roerdalslenk – Massief van Brabant, hebben geleid tot een scheefstelling van de Tertiair – Krijtlagen die gemiddeld met 10 meter per kilometer naar het noordnoordwesten afhellen. Ze hadden ongetwijfeld ook invloed op het sedimentatiepatroon, maar op de korte tijdspanne van de bestudeerde afzettingen (ca 100.000 jaar voor de Kalksteen van Nekum en Meerssen) en de geringe oppervlakte van de grotten is het effect van synsedimentaire tektoniek beperkt. Wel kunnen we vaststellen dat in de richting van de Roerdalslenk, in het Kempisch Bekken, als gevolg van inversietektoniek deze bovenste leden van de Formatie van Maastricht niet vertegenwoordigd zijn en dat in plaats daarvan de verkarsting aan de K/T grens sterk ontwikkeld is.

Het sediment is gekenmerkt door afzetting in een ondiep marien milieu met ongelijke zeebodem en onder invloed van golfwerking. Bovendien is het homogeen van samenstelling en zonder duidelijke laagvlakken, met uitzondering van fossielgruislagen die onder invloed van stromingen geulvormig zijn afgezet, waardoor het zeer moeilijk is een structurele helling te onderscheiden (cf. figs. 36-37). Om de helling en strekking van de Krijtlagen te berekenen moet men een representatief laagvlak construeren dat door verschillende grotten gaat. Drie punten zijn hiervoor in principe voldoende. Twee stratigrafische niveaus konden probleemloos herkend worden, de Horizont van Kanne en de Hardground van Caster. Ondanks variaties in de afzettingspatronen zijn deze niveaus voldoende constant voor structurele reconstructies, in tegenstelling met de top Krijt die door verkarsting en dolinevorming is aangetast.
In Hinnisdael I, II en V is telkens de hoogte van de Horizont van Kanne opgemeten bij de ingang van de grot (Tabel 10). De hoogteverschillen tussen de drie grotingangen zijn zwak maar consistent en wijzen op een structurele gelaagdheid (strekking) van N55W met helling van 0°45' naar het noordoosten.

Tussen Hinnisdael V en VI neemt het hoogteverschil beduidend toe, tot 4,74 m voor de Hardground van Caster en 4,24 m voor de Horizont van Kanne (de onderlinge verschillen wijzen op sedimentaire structuren die het reguliere concordante gelaagdheidspatroon verstoren). Rekening houdend met de strekking der lagen, berekend voor het zuidelijk deel van de Mergelkuilen, komt dit neer op een gemiddelde helling van 4°30'. Een dergelijk gemiddelde is het resultaat van een verticale sprong van een viertal meter, bovenop de normale structurele helling. Aan de ingang van Hinnisdael VI werden in de Hardground van Caster, die er het dak uitmaakt, sterke hellingen tot 12° naar het noordoosten waargenomen.
Verder noordwaarts, tussen Hinnisdael VI en VII (Waterkuil), is de gemiddelde helling, gemeten op de Hardground van Caster loodrecht op de strekking zoals berekend tussen Hinnisdael I, II en V, weer teruggevallen tot een normale 1° naar het noordoosten. De geleidelijke verlaging van de galerijen t.o.v. het grondwaterpeil grotinwaarts in de Waterkuil maakt duidelijk dat deze structurele helling voortgezet wordt. Deze afhelling naar het noordoosten staat haaks op de noordnoordwestelijk gerichte regionale afhelling voor Limburgs Haspengouw (De Smedt et al., 1981). Het is ook in tegenspraak met deze verwachte strekkingsrichting N70E waarlangs de Vechmaalse Krijtvensters zich uitstrekken (Fig. 32).

7.2. Diaklazen en breuken

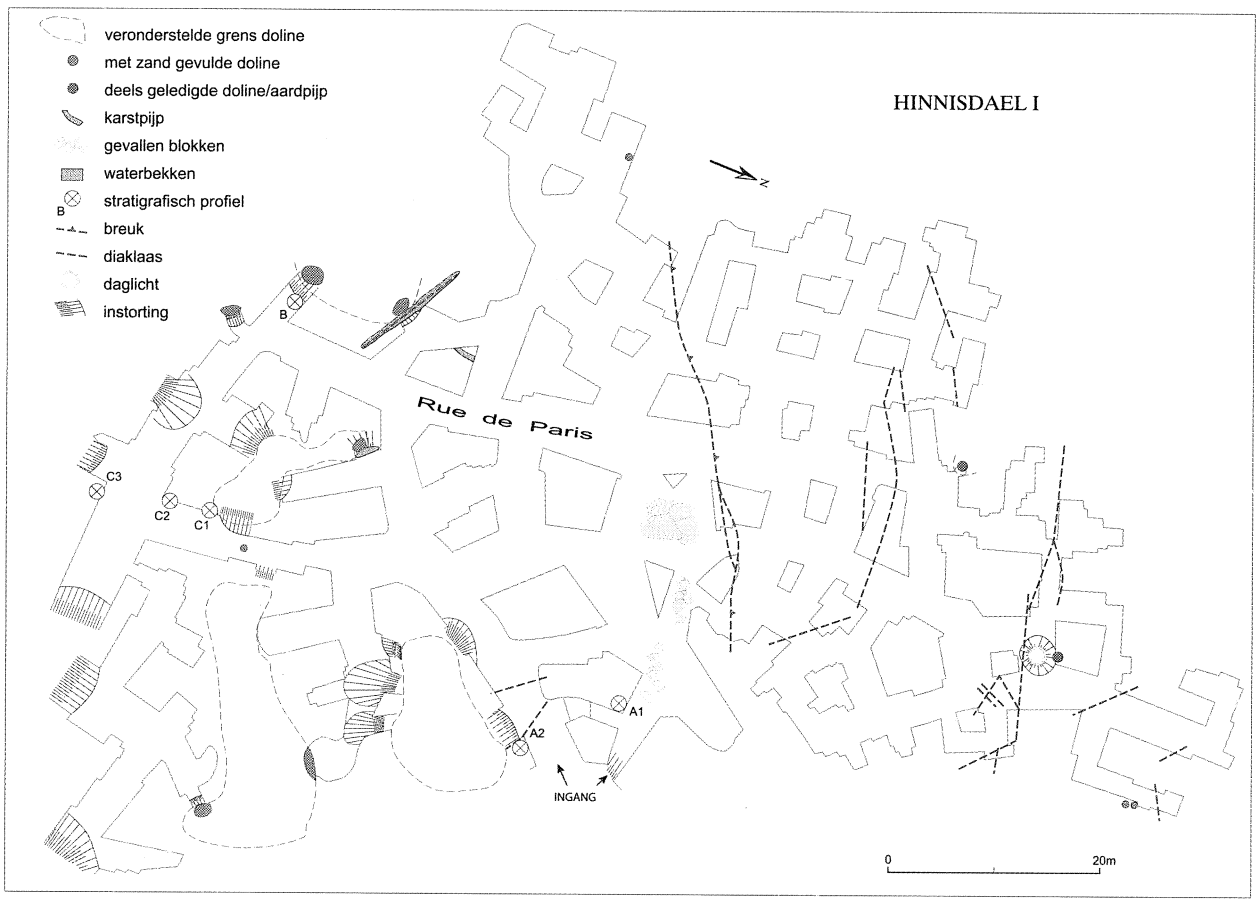
Splijtvlakken zoals diaklazen en breuken kunnen voorkomen in alle sedimenten, ook ongeconsolideerd, en ontstaan in een tektonisch spanningsveld. Men spreekt van een breuk bij verschuiving van de lagen aan weerskanten van het discontinuïteitsvlak en van een diaklaas indien er geen verplaatsing optreedt. In Vechmaal kunnen tektonische splijtvlakken, meestal diaklazen maar ook breuken, onderscheiden worden in het dak van de galerijen en soms tientallen meters vervolgd worden doorheen de pijlers. Alhoewel ze door drukontlasting in rek staan en slechts enkele meters onder het dak van het Krijt voorkomen, werden geen waterinfiltraties en weinig opvulling door bovenliggend materiaal vastgesteld, een aanwijzing voor de ondoorlatendheid van de dunne laag wel erg kleirijk tongeriaanzand (zie afdekkende lagen). De met groengrijs tongeriaanzand gevulde reksplete zijn door hun kleurverschil wel zeer opvallend en blijken doorgaans ook de belangrijkste, meest continue diaklazen of breuken te zijn. Dit kan geïnterpreteerd worden dat het diaklaas- en breuknetwerk werd gevormd voor de afzetting van de tongeriaanzanden en dat het sindsdien nauwelijks seismisch actief is geweest.
Diaklazen hebben soms kanalen gevormd waarlangs verkarsting kan optreden, zeker op de snijding van de diaklaas met een minder doorlatende laag zoals een hardground. Door verkarsting beïnvloede diaklazen kunnen herkend worden als open, door oplossing onregelmatig verwijde spleten (zie fig. 83). Lateraal kunnen deze over-

gaan in zandgevulde spleten. Zelfs open spleten zijn nu onder normale omstandigheden droog. Op schaal van de mergelgrotten heeft het diaklaasnetwerk geen invloed meer op de huidige waterhuishouding.[42]

De voornaamste diaklazen lopen volgens de richtingen N70W en N30E (meting Hinnisdael II) en met zeer steile hellingen die naar het oosten neigen (Figs. 61-62). Vermoedelijk zijn de diaklazen ontstaan na de Krijt-Tertiair overgang tijdens het vroegste Paleoceen (Selandiaan)-(zie vuursteen). Wegens de geringe begravingsdiepte van max. enkele tientallen meter en daardoor de beperkte drukken komen de diaklazen volgens een onregelmatig patroon voor en kunnen ze uitwaaieren met afwijkingen tot 40° van de hoofdrichtingen (tussen N30W en N80E voor de gemiddelde hoofdrichting N70W; tussen N10E en N70E voor de gemiddelde hoofdrichting N30E). Het zijn wel de meest rechte en continue vlakken die als betekenisvol werden beschouwd bij het bepalen van de hoofdrichtingen.[43]

Verschillende diaklazen vertonen lichte verplaatsingen en kunnen uiteindelijk als rekbreuken (of normaalbreuken) beschouwd worden, met gemiddelde helling van 70°, opvulling van het breukvlak met gangmateriaal, antithetische breukvlakjes (Fig. 63), en echelon opstelling of ontdubbeling, en sleurbeweging van de kalksteenlagen naar het breukvlak toe. Twee duidelijke normaalbreuken werden ondergronds waargenomen, in de Waterkuil en in Hinnisdael I.

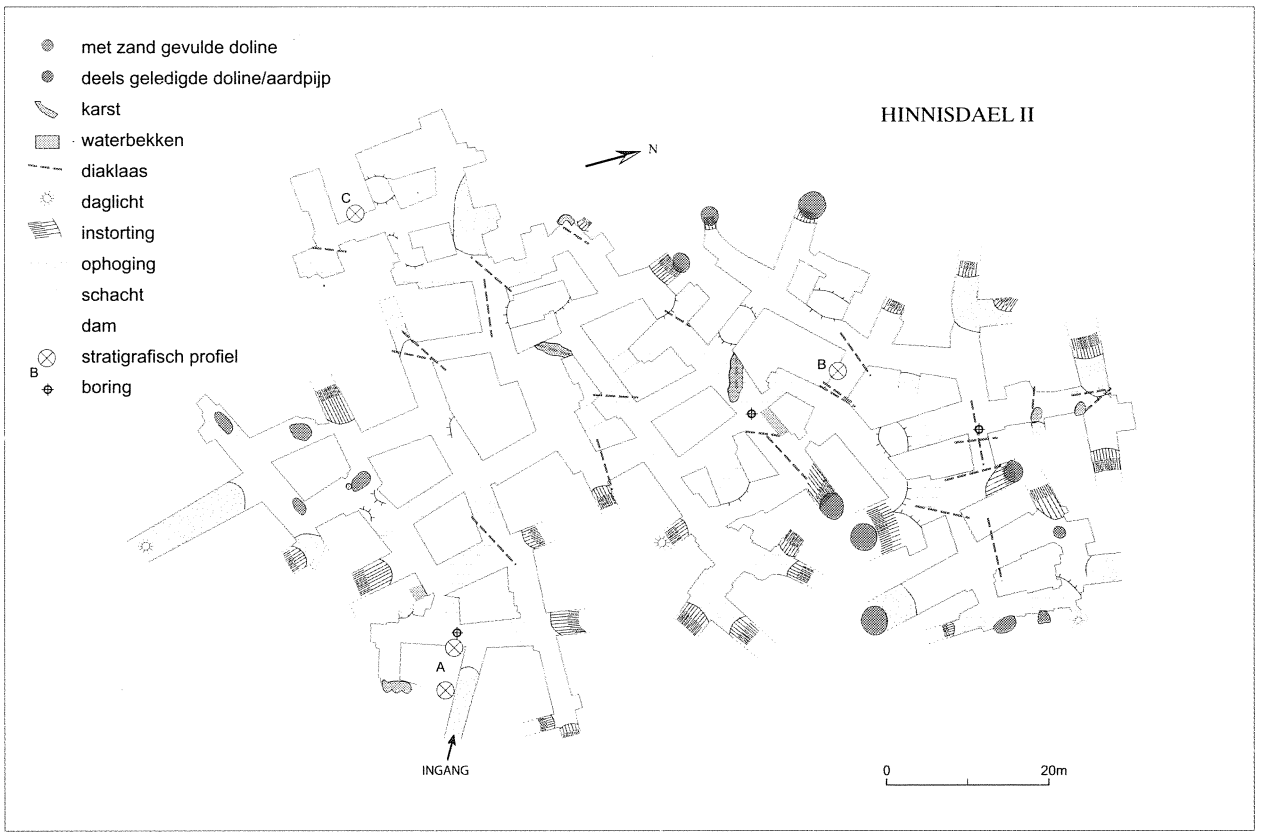
In de Waterkuil werd een breukvlak waargenomen door de eerste pilaar links van de hoofdgalerij (Fig. 64). Het breukvlak doorsnijdt er de Hardground van Caster. Het kan vervolgd worden door het dak van de galerij naar de aanleunende pijlers, licht ondulerend volgens richting N60W met helling 70SW. Deze breuk volgt de strekking van de lagen maar staat tegengesteld aan de algemene afhelling, die er nauwelijks door beïnvloed wordt. De verplaatsing in het breukvlak zelf bedraagt niet meer dan 0,15 m. Op 0,50 m afstand van het breukvlak bedraagt de



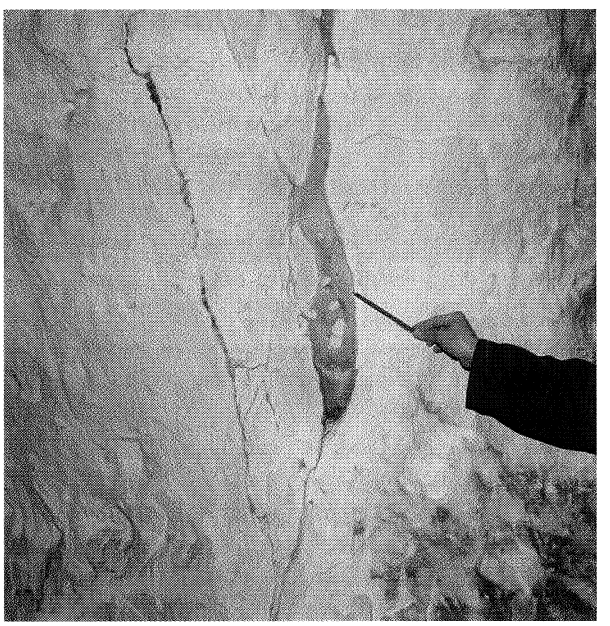
Figuur 61. Topoplan Hinnisdael I met ligging diaklazen, dolines, karstverschijnselen en stratigrafische profielen.

[42] Dit betekent geenszins dat open spleten elders, waar tufkrijtlagen onder de grondwatertafel liggen, niet zouden bijdragen tot de watercirculatie.

[43] De meeste gegevens komen van Hinnisdael I en II. Het aantal observaties met betrouwbare metingen is echter te klein voor statistische verwerking. Daarenboven zijn de splijtvlakken dikwijls sterk ondulerend. Vermits de beste waarnemingen in het dak van de galerijen zijn te maken, zal de gedeeltelijk opgevulde grot Hinnisdael II, met dus een geringere afstand tot het dak, de beste waarnemingen bevatten.



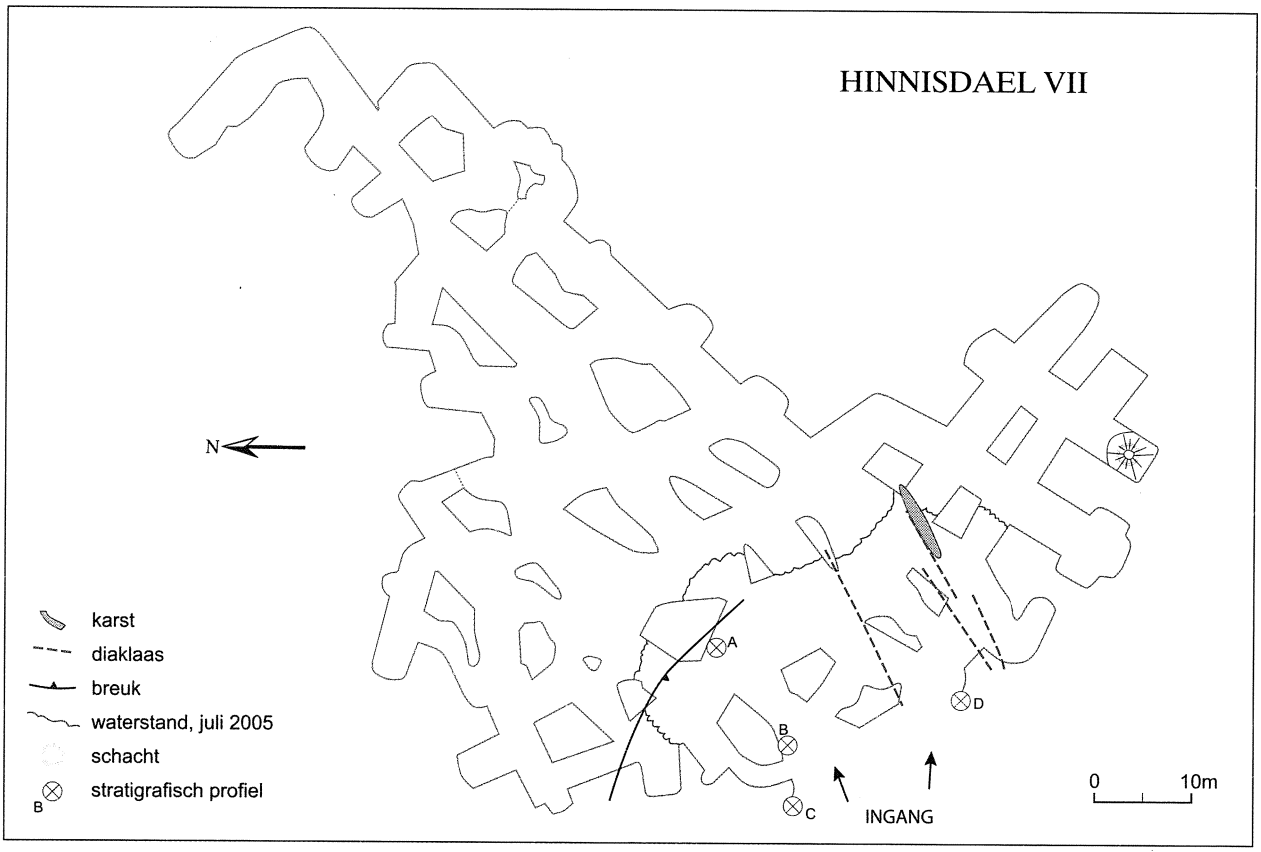
Figuur 62. Topoplan Hinnisdael II met ligging diaklazen, dolines, karstverschijnselen en stratigrafische profielen.



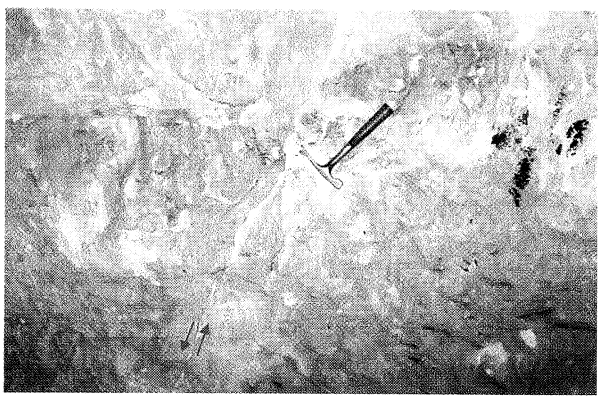
Figuur 63. Breukvlak hellend naar het noordwesten met antithetische, tegengesteld hellende breukvlakjes, opgevuld met gangmateriaal bestaande uit grote kalkarenietfragmenten en fijner kalkarenietgruis, losgerukt van de wanden, ingebed in groen lemig tongeriaanzand. Oostwand 'Rue de Paris', Hinnisdael I (foto J. Verspreet).

verticale verplaatsing reeds 0,27 m door "downdrape" van de "hanging wall" en de totale verplaatsing loopt op tot 0,50 m (Fig. 65). Het is dus een rekbreuk; in het breukvlak komt zeer fijn vergruisd (lemig) krijt voor.
In het noordelijk deel van Hinnisdael I komt een reeks doorlopende diaklazen tot rekbreuken voor volgens strekking N60-70E en met onderlinge afstand van 15 m (Fig. 61). Een breukvlak kan dwars door de grot gevolgd worden volgens N65E 65NW. De verplaatsing van fossielgruislagen door deze breuk is al aanzienlijker en kan oplopen van 0,40 tot 1,20 m (Figs. 66-67).

De belangrijkste breukbeweging in de Mergelkuilen, met verticale spronghoogte van 4 m ligt echter voor de ingang van Hinnisdael VI (Tabel 11). Deze breuk kan geometrisch niet anders dan parallel aan de strekking der lagen liggen en de afhelling versterken (Fig. 15). Vermoedelijk wordt een belangrijk deel van de verticale verplaatsing verwezenlijkt door de flexuur die aan de ingang van Hinnisdael VI werd waargenomen (cf. de grotendeels tektonische helling van 12° hierboven vermeld). Zonder een breukvlak te hebben waargenomen kon het bestaan ervan al vermoed worden wanneer de geometrisch lagere positie van de Waterkuil, met jongere Meerssen Kalksteen, vergeleken wordt met het hogergelegen Hinnisdael I, met oudere Nekum Kalksteen (Tabel 11). Het bestaan van dergelijke breuk was als hypothese vooropgesteld bij



Figuur 64. Topoplan Hinnisdael VII (Waterkuil) met waterstand (juli 2005), ligging breuk en diaklazen, karstverschijnselen, verluchtingskoker en stratigrafische profielen.

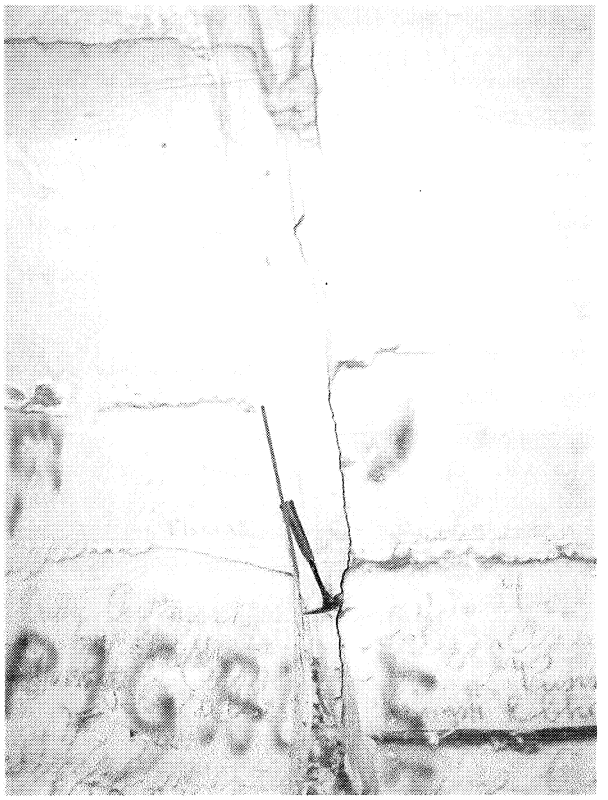


Figuur 65. Zuidwaarts afhellende normaalbreuk in de tweede pijler aan de linkerzijde van de hoofdgalerij die vanaf de hoofdingang de Waterkuil inleidt (breukvlak en relatieve beweging aangegeven door rode pijlen). De verplaatsing in het breukvlak, zoals meetbaar in de top van de Caster Hardground (positie aangegeven door gele pijltjes), bedraagt slechts 1/3 van de totale verplaatsing die door sleurbeweging in de richting van het breukvlak wordt opgevangen. Dit breukje is tegengesteld aan de algemene afhelling van de lagen die grotinwaarts (en dus noordwaarts) daalt (foto M. Dusar).

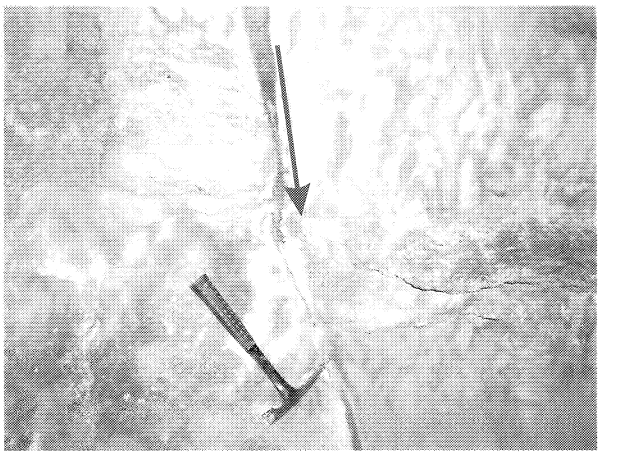
de start van het veldwerk. Verrassend is wel dat deze breuk uiteindelijk niet blijkt te liggen tussen het grottenstelsel van de Waterkuil en de grottenstelsels rond de Mergelkuilen, maar wel deze laatste doorsnijdt ter hoogte van de ingang tot Hinnisdael VI (Fig. 15).

Beide breuksystemen, NW-SE en WSW-ENE (eerder WNW-ESE en SSW-NNE in Hinnisdael II), passen in het regionale breukpatroon dat ten zuiden en oosten van Tongeren in kaart is gebracht (Swerts, 1986[44]; Claes et al., 2001). In noordelijke en oostelijke richting ondergaat de breukrichting een rotatie tegen de wijzers van het uurwerk in, zoals ook met de rand van het Massief van Brabant gebeurt. De vorm van de Mergelkuilen is een complexe assemblage van deze richtingen en zeker geen slenk. Interessant is dat beide richtingen overgeërfd zijn uit het onderliggend Massief van Brabant en als normaalbreuken zijn ontstaan na het Krijt en zowel naar de Roerdalslenk als naar de 'Faille bordière' (zuidelijke grensbreuk van het Massief van Brabant) kunnen verwijzen. Een ruitvormig patroon van rekbreukjes, waarvan het patroon beïnvloed wordt door de Caledonische tektoniek

[44] Dit eindwerk staat in de U. Gent onder een andere titel ingeschreven (Lithologische en paleo-klimatologische invloeden op de morfologie van het Jekerdal) omdat het bestaan van deze neotektoniek toen nog ontkend werd.



Figuur 66. Noordwaarts afhellende normaalbreuk in de westwand van 'Rue de Paris', Hinnisdael I, met verplaatsing van 45 cm in het breukvlak, af te leiden van de verplaatsing van de fossielgruislaag (grootte van de verplaatsing aangegeven door de rode lijn) - (foto M. Dusar).



Figuur 67. Zelfde breuk waargenomen langs oostelijk gelegen pijlers in Hinnisdael I (cf. fig. 61) met verplaatsing van de fossielgruislaag herleid tot 30 cm, met tongeriaanzandopvulling van het breukvlak (rode pijl geeft verplaatsing top van fossielgruislaag weer) - (foto M. Dusar).

(Brabantse vervorming) in het onderliggende Massief van Brabant, kan ontstaan door de interactie tussen de NE-SW gerichte rek van de Roerdalslenk en de SW-NE gerichte dextrale sleurbeweging langs de Faille bordière, de zuidelijke grensbreuk van het Massief van Brabant (Legrand, 1968). In de ombuigingszone van de Faille bordière heeft deze dextrale sleurbeweging pull-apart effecten gecreëerd tijdens het jong-Paleozoïcum met de vorming van het Visé – Puth sedimentatiebekken voorbij de abrupte oostelijke begrenzing van het Massief van Brabant (Bless et al., 1981). Kleine breuktrappen nog op het Massief van Brabant ter hoogte van Vroenhoven – Kanne bevatten reeds Jong-Paleozoïsche sedimentpakketten die snel verdikken in de richting van het Visé – Puth bekken, zoals waargenomen op een reflectieseismisch profiel langs het Albertkanaal (Dusar & Langenaeker, 1992). Het is dus niet uitgesloten dat de kleine krijtbekkens, ontsloten te Vechmaal, eveneens in breukblokjes zijn verdeeld met kanteling van de lagen naar het noordoosten, als complicatie van de algemene afhelling van de deklagen op het Massief van Brabant naar het NNW. Dextrale sleur langs de 'Zone de Cisaillement Nord-Artois' en zijn voortzetting in de Faille bordière was alleszins actief in het Krijtbekken van Bergen (Mons) tijdens het Maastrichtiaan (Vandycke & Bergerat, 1989).

Tot slot nog enkele structurele implicaties over de actuele verspreiding van het bovendeel van de Formatie van Maastricht: de Kalkstenen van Nekum en Meerssen bereiken

	Hoogte Caster Hardground	Hoogte Kanne Horizont	Caster - Kanne
Hinnisdael I	99,10	96,35	2,75
Hinnisdael II	-	97,77	-
Hinnisdael V	98,26	94,96	3,30
Hinnisdael VI	93,52	90,72	2,80
Hinnisdael VII	92,08	-	-

Tabel 11. Hoogte t.o.v. zeeniveau (m TAW) en intervaldikte (in meter) van de referentiehorizonten van Kanne en Caster aan de ingang van de grotten. Ontbrekende waardes betekenen dat het desbetreffend stratigrafisch niveau niet voorkomt. De hoogtesprong waargenomen voor deze horizonten tussen Hinnisdael V en VI, gelegen op 70 m afstand van elkaar, 65 m volgens de richting van de grootste helling, wijst op het bestaan van een normaalbreuk tussen beide grotingangen.

in Vechmaal-Horpmaal hun westelijke verbreidingsgrens. Nochtans is er geen sedimentologische aanwijzing dat dit gebied bij de rand van het sedimentatiebekken zou liggen. De verklaring voor de huidige begrenzing is structureel. Volgens de lijn St.-Truiden-Alken-Hasselt zit de uitwigging van de toplagen van het Krijt al dieper in de Formatie van Maastricht. De westelijke verbreidingsgrens van de Kalkstenen van Nekum en Meerssen volgt een patroon dat nadien nog gevolgd zal worden door de ditmaal oostelijke begrenzing van Paleocene formaties zoals Heers, Hannut, Tienen, en die gepaard gaat met het voorkomen van NNE-SSW tot NE-SW gerichte flexuren en breuken (cf. De Smedt et al., 1981; zie ook de oost-west profielen in Claes & Gullentops, 2001).

In de mijnstreek is het stratigrafisch hiaat aan de top van het Krijt systematisch beperkt tot de Kalkstenen van Nekum en Meerssen maar komt wel de Paleocene Formatie van Houthem overal voor (Felder, 2001). Dit is gelieerd aan de inversietektoniek langs de Roerdalslenk: inversie tijdens het laat-Maastrichtiaan, relaxatie tijdens het vroegste Paleoceen (Rossa, 1986). De oost-west gerichte ontsluitingszone van de Formatie van Maastricht tussen Valkenburg en Heers, dwars over de oostrand van het Massief van Brabant en tot tegen de Roerdalslenk (Fig. 3) is van de laat-Maastrichtiaanse inversie gevrijwaard.

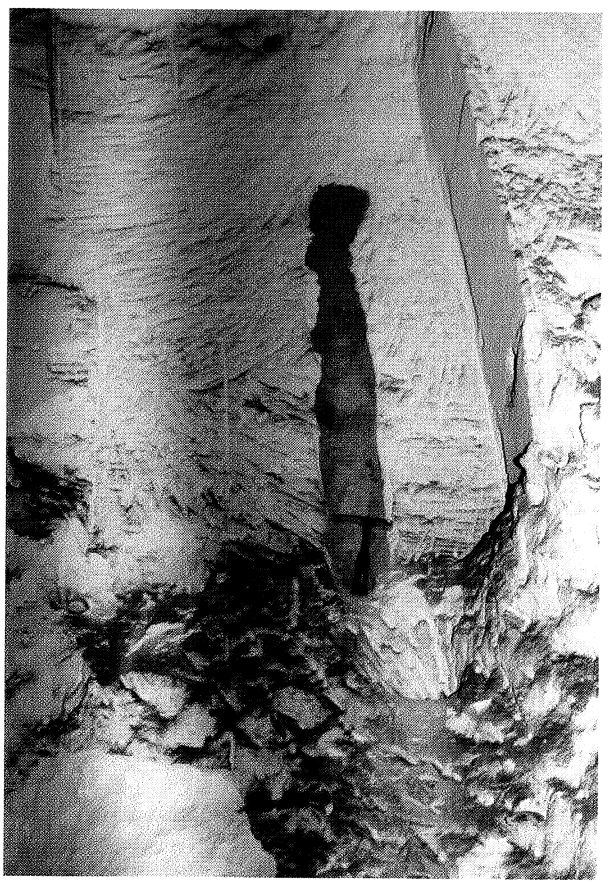
8. Karst

De mergelgrotten van Hinnisdael zijn weliswaar uitgegraven door de mens maar doorsnijden toch talrijke natuurlijke oplossingsfenomenen. Vroeger werd aan kleine onregelmatigheden van natuurlijke oorsprong in de wand of het dak van de galerijen weinig aandacht besteed en ze bleven zodoende onopgemerkt. Toch zijn ze getuigenissen van de paleogeografische evolutie en kunnen ze grote invloed uitoefenen op de waterhuishouding en de productiviteit van de Maastrichtiaan-aquifer. Dolines en instortingen, oud of recent (voor, tijdens of na de mergelwinning), met trechters of puinkegels gevuld met leem en zand uit de bovenliggende afsluitende lagen waren meer hinderlijk tijdens het delven van de galerijen en blijven gevaarlijk.

Oplossing van bovenuit, aan de bovenkant van de kalklaag wordt exokarst genoemd, kalkoplossing binnenin het kalksteenmassief endokarst. Net als bij karstwerking en grotvorming in de massieve kalkstenen van Onder-Carboon of Devoon ouderdom ten zuiden van Samber-en-Maas moet een aantal voorwaarden vervuld zijn:

- aanwezigheid van oplosbaar gesteente (in dit geval tufkrijt), in contact met koolzuurhoudend water;
- spleten, die door rek of drukontlasting open staan, of onderling verbonden poriën, zodat water kan infiltreren en in geconcentreerde stroombanen geleid worden;
- een potentiaal- of hoogteverschil tussen in- en uitstroom van het water, zodat opgeloste stoffen kunnen worden afgevoerd.

In tegenstelling met de oudere, Paleozoïsche Zuidbelgische kalkstenen, waarin grote grotten tot ontwikkeling komen, blijft de karstwerking in de krijtlagen kleinschalig. Dit komt omdat het tufkrijt zeer poreus is, zodat het water meer diffuus gaat infiltreren, waardoor oplossing verspreid verloopt en grote oplossingsholten beperkt blijven. Anderzijds komen er wel wat open spleten voor en heterogeniteit in de afzetting, bijv. hardgrounds of silexbanken die toch een concentrerend effect hebben op percolerend grondwater en karstificatie in de hand kunnen werken. Een bijkomende reden is de geringe diepte tot het grondwater, wat effectief de stroomsnelheid plots en sterk doet teruglopen en aldus een drempel legt voor diepe karstwerking.



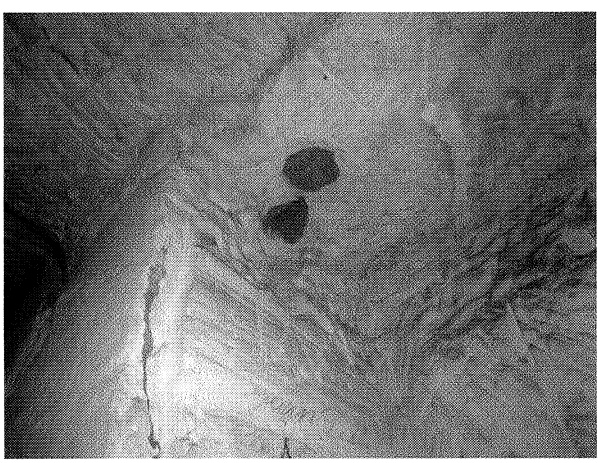
Figuur 68. Doorsnede door geologische orgelpijp, gevuld met bruin lemig zand, Hinnisdael V (Hussenkuil)-(foto J. Frankie).

Exokarst wordt gekenmerkt door inzakkingskegels of dolines, waarvan de basis of de flanken soms aangesneden worden door de galerijen. In de grotten Hinnisdael I en Champignonskuil werden een 20-tal dolines van wisselende grootte op de grotplannen ingetekend (Fig. 26). Zij zijn ouder van aanleg dan de artificieel gedolven mergelgrotten, en hun inhoud is in vele gevallen deels uitgevloeid in de open ruimte. Een deel van de oppervlakkige instortingskegels kan ook verklaard worden door ledigen van de dolinevulling in de galerijen[45]. Sommige dolines werden in meerdere galerijen aangesneden, wijzend op doormeters tot 20 m. Geologische orgelpijpen, of aardpijpen, zijn de lokale benaming voor de diep doordringende verticale, ronde oplossingsstructuren onder een trechtervormige oppervlakkige doline (cf. Rademakers, 1998). Geologische orgelpijpen zijn niet als oplossingsholte ontstaan, maar bevatten geleidelijk ingezakte deklagen. In Hinnisdael I, V en VI werden met geologische orgelpijpen overeenkomende verweringswortels onder dolines met doormeters op centimeter- tot decimeterschaal waargenomen (Figs. 68-69). Vermoedelijk gebeurt de overgang van een brede doline naar een nauwe geologische orgelpijp onder een redelijk afsluitende laag die voor een insnoering zorgt (zeker rekening houdend met de geringe diepte tot de top van het krijt, in recente positie slechts enkele meters diep). Dolines en geologische orgelpijpen in hun huidige vorm dateren van na de afzetting van het tongeriaanzand, dat meegezakt is en lokaal enkel bewaard in de dolines. Er is alleszins ook een vroegere fase van dolinevorming geweest (tussen Paleoceen en Oligoceen), te oordelen naar de bewaringsstaat van de Gelinden Mergels. Niet alle depressies vinden neerwaartse voortzetting in geologische orgelpijpen. In dit geval kunnen we beter spreken van ingezakte verweringsmantels ten gevolge van een onregelmatige maar sterke oplossing van het bovenvlak van de kalksteen, als eerste in contact tredend met het door humuszuren en koolzuurgas verzuurde bodemwater. Met name in de Champignonskuil kunnen in het dak meerdere vensters op de overdekkende vlakke tongeriaanzanden waargenomen worden (Fig. 70).

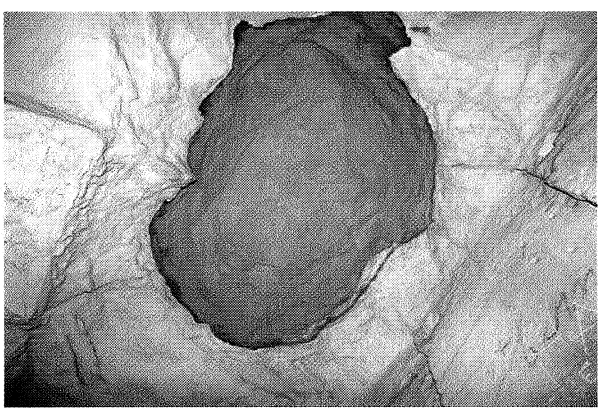
Anderzijds zijn er ook instortingen die geen karst voorgeschiedenis hebben maar te wijten zijn aan het bezwijken van pilaren of dakbreuk waardoor delen van de grot begeven en inzakken. Aan de oppervlakte ontstaat een brede zakkingszone met steilwanden, aanvankelijk zonder zichtbaar contact met het krijt, wat later wel kan voorkomen wanneer afstromend water zich verzamelt in de depressie en zich een erosieve weg baant naar de open galerijen. Het onderscheid tussen dergelijke recent gevormde instortingen en oude dolines met in de aanpalende galerijen uitgevloeide vulling is meestal onduidelijk, tenzij men zicht krijgt op het gat doorheen het dak van het krijtgesteente.

Bij endokarst treedt er meer morfologische variatie op:

- uitgeschulpte corrosievlakjes op centimeter tot decimeterschaal (Figs. 71-74);
- concentratie van alveolen, ronde uithollingen waarvan de grootste 50 cm doormeter halen. Alveolen worden doorsneden in het dak en op de wanden van de galerijen, ogenschijnlijk zonder verband met het fracturatiepatroon (Figs. 75-76);
- meterslange horizontale tunnels met ronde of ovalen doorsnede tot 1 meter in hoogte en meerdere meters in breedte. Zij kunnen aansluiten bij een barst of in een gelaagdheidvoeg ontwikkelen. Enige vervorming



Figuur 69. Geologische orgelpijpen als verweringswortels van een doline, horizontale doorsnede in het dak van een galerij, Hinnisdael I (foto L. Willems).



Figuur 70. Vlakke onderkant van een doline of van een ingezakte verweringsmantel in het dak van een galerij, gevuld met groenig, ondoorlatend tongeriaanzand dat rood oxideert in contact met het poreuze tufkrijt. Hinnisdael I (foto J. Verspreet).

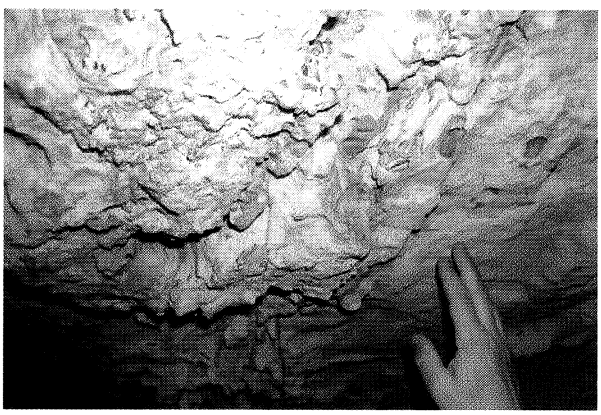
[45] Enkele brede instortingsdolines met steile wanden, terug te vinden ten zuiden van de ingangen van Hinnisdael I of van de Champignonskuil zijn geen karstwerking. Hun ontstaan is van recente datum en het gevolg van de mergelwinning.

door blokbrekers en berglopers of door dieren die er hun schuilhol in zochten kan nooit worden uitgesloten (Figs. 77-79);
- restanten van decimeter-smalle stroomkanaaltjes of 'anastomosen', die een netwerk vormen in laagvlakken waarin de freatische grondwaterbeweging geconcentreerd wordt,en waar te nemen in het dak van de galerijen in hardere tauwlagen of hardgrounds (Fig. 80).

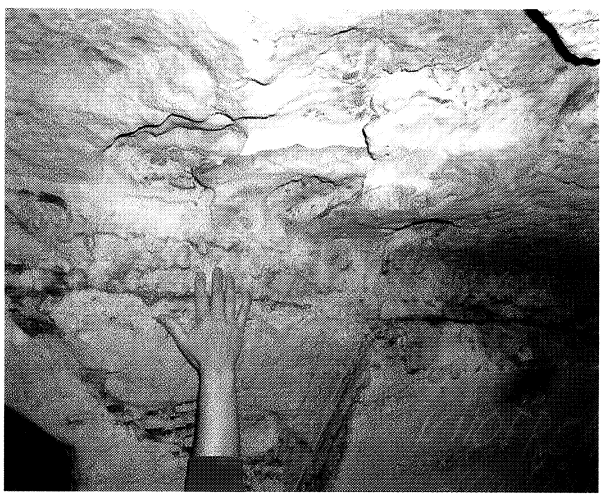
Stratiforme karstontwikkeling, met name uitschulpingen, alveolen en anatomosen, wordt geaccentueerd in vroegtijdig verharde banken. Dit zijn de hardgrounds of sommige fossielgruislagen, gemeenzaam tauw genoemd, met name in de Caster Hardground en de eerstvolgende hardground in de Kalksteen van Meerssen (Waterkuil) en in mindere mate in de Kanne Horizont (Champignonskuil).

De corrosievormen zijn soms scherpgerand en soms afgerond. In het eerste geval zijn ze ontstaan in langzaam bewegend grondwater, wanneer de kalksteen zich nog onder de grondwatertafel bevond. De afgeronde vormen staan meer in verband met exokarst. Ze onstaan op het contact tussen het tufkrijt en het opvulmateriaal langs barsten en verweringsresidus.

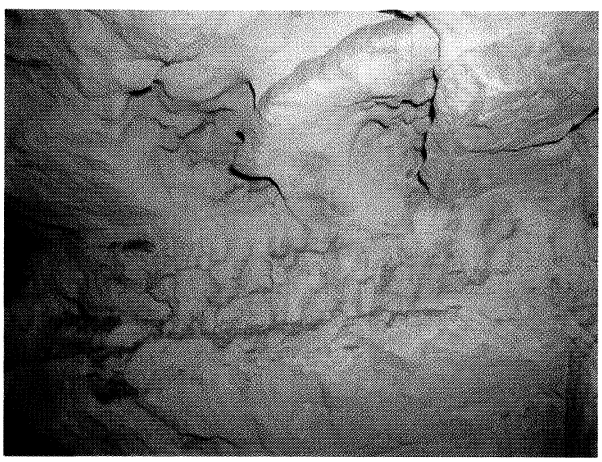
De zones met tunnelvormige uithollingen zijn vergelijkbaar met waarnemingen in de mergelgrotten van de Sint-Pietersberg bij Maastricht (Willems *et al.*, 2005). Oplossingsresidu's ontbreken en ze vertonen geen voorkeurrichtingen of verband met de tektoniek. De alveolen worden dan ook geïnterpreteerd als fossiele kernen van corrosie in de freatische zone van de grondwaterlaag.



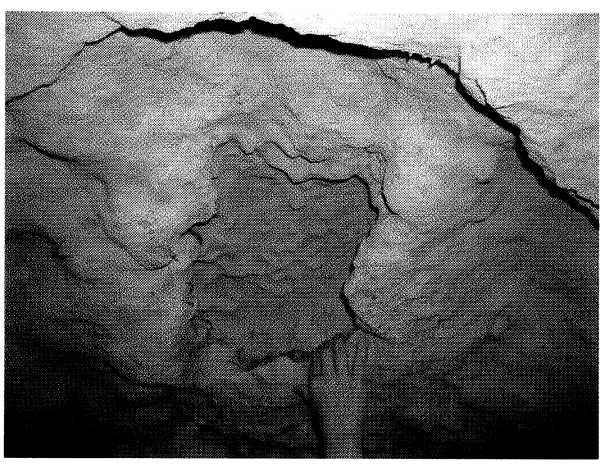
Figuur 71. Verkarste zone gekenmerkt door uitgeschulpte corrosievlakjes, Hinnisdael II (foto L. Willems).



Figuur 73. Dak van een uitgeschulpt stroomkanaal met secundaire oplossingsverschijnselen in het dak van de galerij, met twee Pecten-lagen (aangegeven door ronde bruine vlekken), gevolgd door de bovenhouw (zie Exploitatietechniek). Hinnisdael II (foto L. Willems).



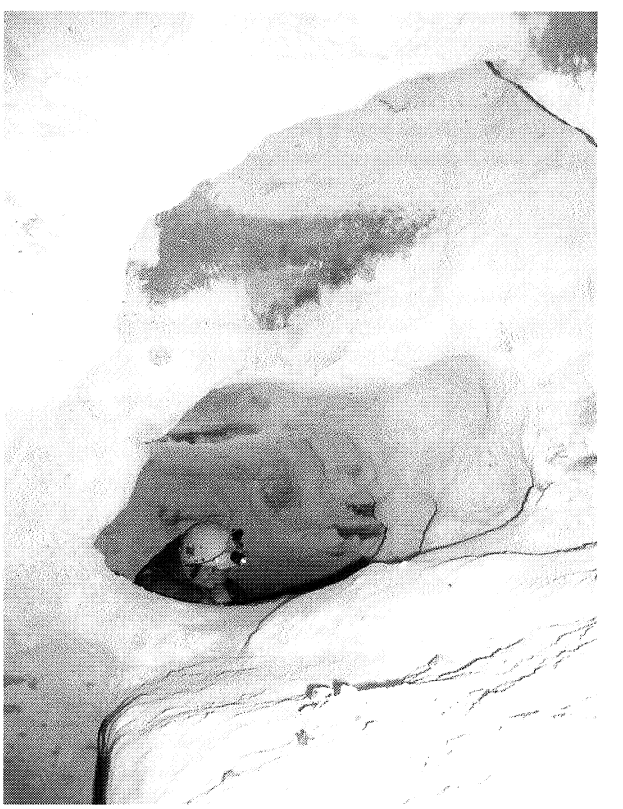
Figuur 72. Dak van een uitgeschulpt stroomkanaal met secundaire oplossingsverschijnselen in het dak van de galerij, Hinnisdael II (foto L. Willems).



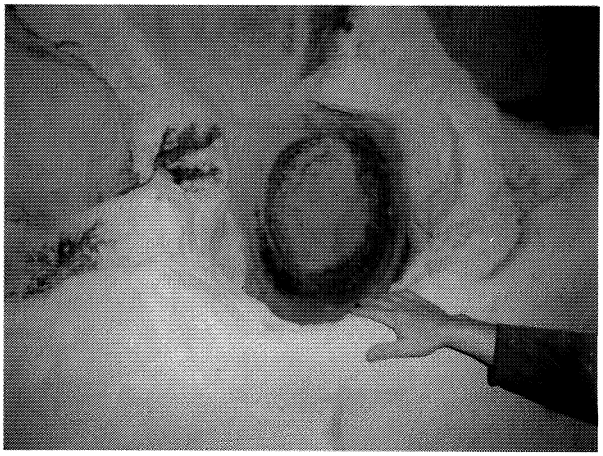
Figuur 74. Dak van een uitgeschulpt stroomkanaal met secundaire oplossingsverschijnselen, Hinnisdael II (foto L. Willems).

Figuur 75. Zone met overlappende grote alveolen, Hinnisdael II (foto L. Willems).

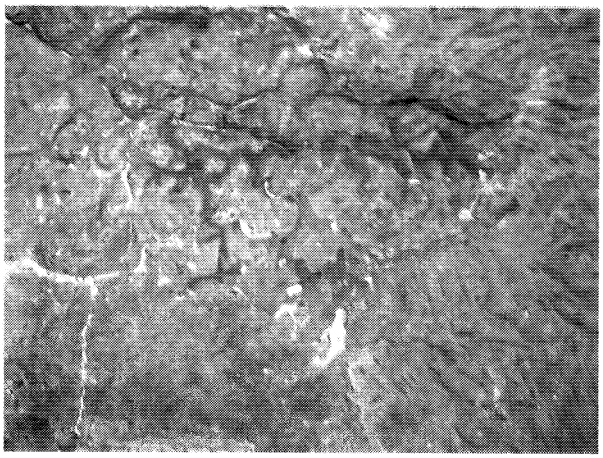
Figuur 76. Cluster van alveolen, Hinnisdael II (foto L. Willems).



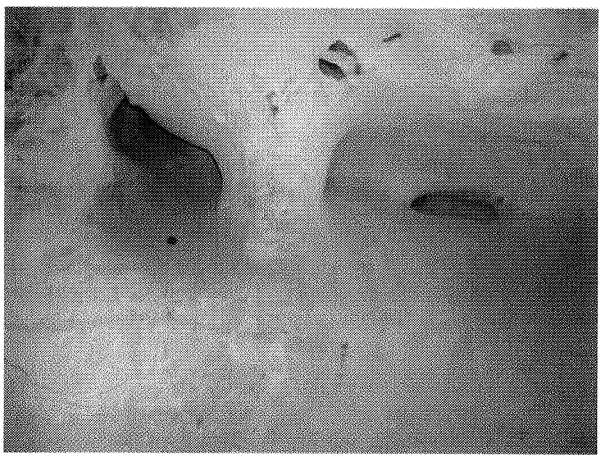
Figuur 77. Metersgrote alveolen aangesneden door een galerij (voorgrond), Hinnisdael II (foto L. Willems).



Figuur 78. Grote ronde alveool in het dak van een galerij, als onderdeel van een verkarste zone, Hinnisdael II (foto L. Willems).



Figuur 80. Horizontale anastomosen uitgaande van een verkarste diaklaas in de tweede hardground van de Kalksteen van Meerssen, waar te nemen in het dak van Hinnisdael VII (Waterkuil) in het verlengde van de zuidelijke ingang (foto M. Dusar).



Figuur 79. Horizontale gangen ontwikkeld langs een steile barst (linkerbeeld) en langs en subhorizontale gelaagdheidsvoeg (rechterbeeld), mogelijk licht veranderd door menselijk gebruik. De schaal wordt aangegeven door de zwarte lenskap aan de ingang van de linkergang – Hinnisdael I (foto L. Willems).

De vorming is oud; in ieder geval duidelijk voor de ontginning door de mens en zelfs voor de laat-Tertiaire opheffing van het land.

Anastomosen langs de bovenkant van horizontale oplossingszones wijzen op de aanwezigheid van geconcentreerde stroomkanalen (paleodrains). Hun wanden zijn uitgestulpt door kleine afgeronde alveolen. Anastomosen wijzen op vermindering van de drainagecapaciteit, mogelijk door opvulling van de hoofdkanaal (main drain), in ieder geval ook ontstaan lang voor de ontginning door de mens.

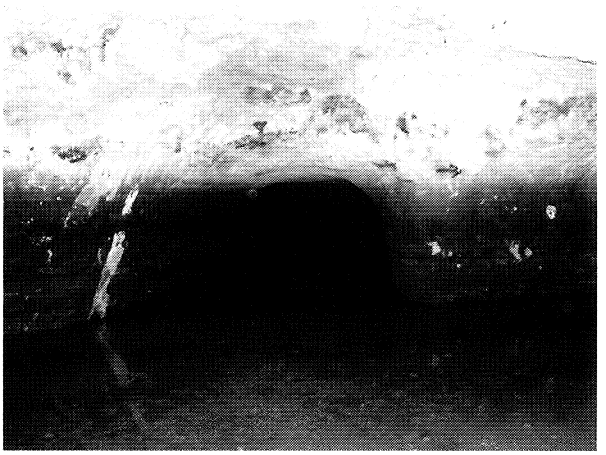
Soortgelijke structuren als de karstfenomenen te Vechmaal zijn waargenomen en onderzocht in de St.-Pietersberg (Smitshuysen, 1983; Didden, 1996; Rademakers, 1998; Willems *et al.*, 2005a, b). Karstfenomenen in de Normandische krijtrotsen zijn zelfs veel omvangrijker, ondanks de eveneens hoge intrinsieke porositeit (tussen 23,6 en 42,5 % in het Krijt van Haute Normandie; Masson (1973) in Rodet, 1991, p. 65). In deze witte krijtlagen is de nuttige of effectieve porositeit evenwel van de orde van grootte van slechts 1%. De nuttige porositeit wordt bepaald door onderling verbonden poriën, wat efficiënt watertransport toelaat en dus ook verband houdt met de permeabiliteit (Megnien, 1964). Bij lage nuttige porositeiten spelen net als in de Paleozoïsche kalkstenen van Zuid-België andere factoren een rol van betekenis bij de verkarsting, zoals (micro)fracturatie, verdichting op hardgrounds of fossielgruislagen e.d. (Roux, 1978 ; Rodet, 1991). Karstontwikkeling in het Maastrichts tufkrijt wordt belemmerd door de hogere nuttige porositeit en de geringe diepte tot het grondwater, en lijkt in natuurlijke omstandigheden nauwelijks actief. Anders is de situatie in diepe groeven, zoals in de ENCI groeve in de St.-Pietersberg, waar diepe karstwerking gereactiveerd wordt door de ontwatering en de sterke hydraulische gradiënt die hierdoor ontstaat. Karstverschijnselen nemen weinig tijd om te ontstaan. De zachte kalklagen van het Krijt zijn zeer reactief en gaan sneller in oplossing dan de dichte Paleozoïsche kalkstenen; de zwakke cementatie vergemakkelijkt de mechanische erosie zodat spleten snel verwijden. De paleokarst is daarenboven goed bewaard. Dit alles maakt dat karstwerking toch betekenisvol is, ten minste in de toplagen van het Maastrichts tufkrijt.

9. Grondwater

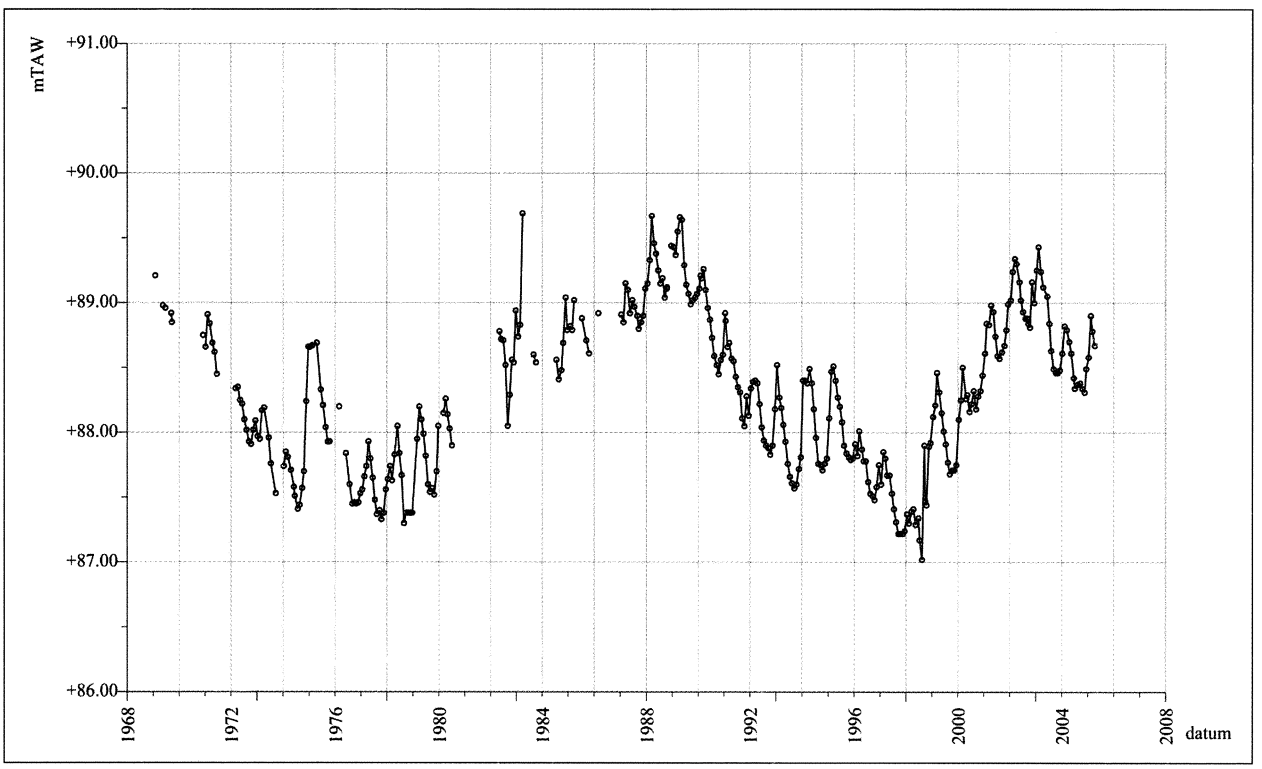
9.1. Grondwaterstanden

De Waterkuil heeft uiteraard zijn naam te danken aan het grondwater dat hier tot vlak bij de ingang staat. Dit is echter niet altijd het geval want het waterpeil fluctueert. Tijdens de exploratie in juni 2005 was het water maximaal 1,25 m diep en reeds enkele jaren in dalende trend. Toch was goed te zien aan de rosbruine verkleuring van de wanden dat het peil nog een meter kon stijgen (Fig. 81). Dan staan de diepste gangen quasi volledig onder water. Anderzijds zijn er jaren dat de grot omzeggens volledig droog staat. De kleinere grot Hinnisdael VIII, vlak naast de Waterkuil gelegen staat eveneens onder water. Ook Hinnisdael VI en de Hussenkuil reiken tot aan het grondwater, maar staan in periodes van lage waterstand volledig droog. Zelfs Hinnisdael I zal in periodes van zeer hoge waterstand in de diep uitgegraven gangen tussen de noordelijke ingang en de grote instortingszone en in de noordelijke uiteinden deels onder water lopen (omgeving verluchtingskoker). Dit is niet geheel verwonderlijk aangezien de lagen globaal naar het noorden afhellen, dus ook het ontginbare deel van de Kalksteen van Nekum, en zo geleidelijk in de grondwaterzone terechtkomen.

Het waterpeil vertoont dus schommelingen van iets meer dan 2 m volgens een meerjarige trend, die veel belangrijker is dan de jaarlijkse variatie tussen zomer en winter die hooguit 50 cm bedraagt (30 cm in het jaar 2004 voor MAP put 610/82/1 die langs de toegangsweg naar de Mergelkuilen van Hinnisdael ligt). De meerjarige oscillatie vertoont een trend die de op seizoensbasis vastgestelde neerslagoverschotten of –tekorten volgt. Grondwaterpeilmetingen sinds 1968 in een peilput te Vechmaal tonen minima in 1978 en 1998 en maxima in 1968, 1989 en 2003 (Fig. 82).



Figuur 81. Gedeeltelijk onderwaterstaande galerij in Hinnisdael VII (Waterkuil), met drijvende calcietplaatjes. De rosbruine verkleuring van de wanden geeft de maximale hoogte van het schommelende grondwaterpeil weer (foto M. Dusar).



Figuur 82. Meerjarig verloop der grondwaterstanden van de Maastrichtiaan grondwaterlaag in peilput 106E765 te Vechmaal.

Onderwater lopende mergelgrotten zijn vrij zeldzaam – ten slotte moesten ze droog gedolven worden – maar toch zijn er vergelijkbare gegevens, bijv. uit de Gemeentegrot te Valkenburg (van Schaik & Starmans, 1985). Ook deze grot vertoont fluctuaties van 2 m in de waterstand, die met het grondwaterpeil overeenstemt, volgens een meerjarige cyclus met een maximum in 1968, een minimum in 1976 en een sterke stijging in 1983. De kleine verschillen met Vechmaal zijn subjectief: het peil bereikt zijn hoogste of laagste stand gedurende 2-3 jaar, waarbinnen seizoensschommelingen voor veranderlijke piekjes zorgen. In de Gemeentegrot te Valkenburg werd wel een vertraging van 18 maanden vastgesteld t.o.v. de neerslagevolutie, een teken van de lage permeabiliteit van de deklagen. In Vechmaal speelt deze vertraging een meer beperkte rol wegens de geringere diepte van de grotten.

Opvallend is ook het sterke verhang van deze Maastrichtiaanse waterlaag in noordelijke richting, vanaf de waterscheidingskam tussen Vechmaal en Lauw (Gulinck, 1974). In de Waterkuil stond het grondwaterpeil op 90,10 m in juni 2005. De eerste en hoogstgelegen uitstroming gebeurt langs de Asborn, gelegen bij het Kasteel van Henisdael en ligt reeds op het peil 82 m. Dit is de hoogst gelegen bron van de Herkebeek of Molenbeek. Van hier uit leidt een droog dal naar de Mergelkuilen. De lokale waterbeweging in de Maastrichtiaanse waterlaag volgt waarschijnlijk dezelfde richting, in overeenstemming met de regionale piëzometrie van de Maastrichtiaan aquifer (De Smedt et al., 1981). Gebeurlijke vervuiling van de grotten zal dus ook in de richting van de Asborn geleid worden.

De grondwaterlaag in het Krijt is als semi-freatisch te beschouwen. Peilput 106E0765 toont dit aan (Tabel 12): bij hoge grondwaterstanden stijgt het waterpeil in rust tot 1,20 m, vlak onder de bouwvoor in de leemlaag. Toch blijft de omgeving droog en bevindt het bronniveau zich 1 km verder noordwaarts en 5 m lager. De zwakdoorlatende leemlaag is gemiddeld 3-4 m dik, maar bereikt lokaal 7 m. De lemige tongeriaanzanden zijn daarentegen niet meer dan 1-2 m dik rondom de Mergelkuilen van Hinnisdael, maar dit is voldoende om directe infiltratie in de grotten tegen te gaan. De vochtigheid die er wordt waargenomen is te wijten aan condensatie uit de lucht. Enkel bij combinatie van waterverzadiging der deklagen en intense neerslag zal water uit een aantal puntlocaties toestromen en modder aanvoeren, zoals blijkt uit de opvulling van de Champignonskuil. Dit toont aan dat zelfs in het ontsluitingsgebied van de Formatie van Maastricht, die algemeen als enige intrekzone voor de voeding van de regionaal belangrijke Maastrichtiaan-aquifer wordt beschouwd, de aanvulling van het grondwater erg geconcentreerd verloopt.

GeoDoc nummer	106E0765
DOV nummer	7-0044
ligging	Vechmaallaan, Vechmaal (gemeente Heers)
type boring	peilput
opdrachtgever	Belgische Geologische Dienst
boorfirma	Smet
boordatum	1968
Lambert coordinaten	X 222 200
	Y 161 250
maaiveld	Z +90,49 m
totale diepte	23,90 m ? (monsters tot 17,50 m)
boormethode	droogboring tot 16,90; nadien inspoeling
verbuizing	211 mm tot 16,90 m
eind-boorgatdoormeter	159 mm
filter	16,90-22,90 m (6 m lengte)
grondwaterstand in rust	1,32 m (10/6/1968)
pompproef (1968) debiet	12 m³/h
pompproef (1968) afpomping	6,32 m
stratigrafie	
Quartair	0 – 7,50 m
Kalk van Meerssen	7,50 – 17 m
Kalk van Nekum	17 – 23,90 m

Tabel 12. Peilput te Vechmaal, algemene informatie (volgens Gulinck, 1974, GeoDoc boorarchief van de Belgische Geologische Dienst, en DOV, Databank Ondergrond Vlaanderen).

9.2. Relatie karst – grondwater

De karstontwikkeling die vanaf de K/T grens en tijdens het Tertiair ontstaan is, wordt onopvallend maar toch algemeen waargenomen (Willems et al., 2005). In groeven en mergelgrotten zijn de meest opmerkelijke fenomenen open karstgalerijen, alveolen en anastomosen, meestal verbonden met rekspleten als voeding, maar soms ook horizontaal uitgestrekt langs discontuïteitsvlakken zodat de verbinding met het spletenpatroon onduidelijk wordt. Vooral de Caster Hardground is aangevreten door wijdverspreide karstoplossing. In de droge mergelgrotten is dit paleokarstsysteem, waarvan de horizontale componenten in de freatische zone zijn ontstaan, niet meer actief, m.a.w. fossiel. Ook de rekspleten staan droog (Fig. 83). Verkarste spleten kunnen goed herkend worden aan hun verweringsrand die uit verharde kalk bestaat[46] (Fig. 84).

Meer naar het noorden, in de Kempen en de Roerdalslenk, zijn er eveneens aanwijzingen voor paleokarst: hiaat top Maastrichtiaan (leden van Meerssen en Nekum ontbreken), oplossing en diagenese onder meteorische omstandigheden, bestudeerd in boring Molenbeersel (Bless et al., 1993; Swennen & Dusar, 1997), logbeeld geofysische boorgatmetingen (Felder et al., 1985). Onder bedekking door een dik pakket Cenozoïsche lagen zal compactie optreden, maar restporositeit en –permeabiliteit zal zeker blijven en waarschijnlijk verantwoordelijk zijn voor de zeer hoge waterproductie die vaak wordt gehaald in de top van de Maastrichtiaan aquifer. De zeer hoge opbrengsten (tot een factor 10 hoger dan normaal) die gehaald worden uit de bovenste meters van de Maastrichtiaan aquifer worden traditioneel verklaard door de hoge porositeit van het tufkrijt, versterkt door het spleetpatroon.

In Vechmaal kan echter vastgesteld worden dat deze beide factoren van ondergeschikt belang zijn: de gemeten porositeit en zelfs permeabiliteit van het tufkrijt vertoont maar weinig schommelingen, rekspleten zijn weinig talrijk en daarenboven grotendeels gevuld met impermeabiliserende tongeriaanzanden. Een waterput heeft maar weinig kans een productieve barst aan te boren. De paleokarst is daarentegen algemeen voorkomend in zones met hardgrounds en bovendien geconnecteerd zodat ze als een uitstekend permeabiliteitskanaal kan fungeren. Een nieuw model voor grondwaterstroming in de top van de Maastrichtiaan aquifer wordt hiermee aangereikt.

De Mergelkuilen van Hinnisdael vormen daarenboven een enigmatische site (figs. 1-2): is de rechthoekige onregelmatige depressie een uvala[47] of eerder een verlaten dagbouwgroeve, een ingestorte mergelgrot, een verdedigingswerk rond een burcht, of een combinatie van deze factoren? Onder dergelijke omstandigheden is de stand en toestroming van grondwater moeilijk voorspelbaar. Een waterput geboord in 1968 bij de ingangsweg tot de

Figuur 83. Systeem van parallelle barsten, open tot alveolair verwijd door karstoplossing. Lateraal gaan deze barsten over in met tongeriaanzand gevulde diaklazen. Hinnisdael I, vlak naast de doline getoond op fig. 26 (foto J. Verspreet).

Figuur 84. Verkarst open splijtvlak met verdichte rand door kalkneerslag, Hinnisdael II (foto L. Willems).

[46] De uitstekende, verharde wanden zijn ontstaan door oplossing van de kalk in de spleet en neerslag van die kalk in een zich verdichtende randzone, te vergelijken met de uitlogings- en inspoelingshorizonten in een bodemprofiel. Dit fenomeen kan slechts optreden in open spleten met actieve watercirculatie en is slechts waargenomen in spleten zonder opvulling door tongeriaanzand. De morfologie van deze verharde wanden in het dak van de galerijen doet vermoeden dat ze pas zijn ontstaan na uitgraving, ondanks het feit dat al deze barsten nu inactief en dus droog zijn. Dit zou betekenen dat de verharde randen snel aangroeien ten tijde van kortstondige, uitzonderlijke klimatologische 'events'.

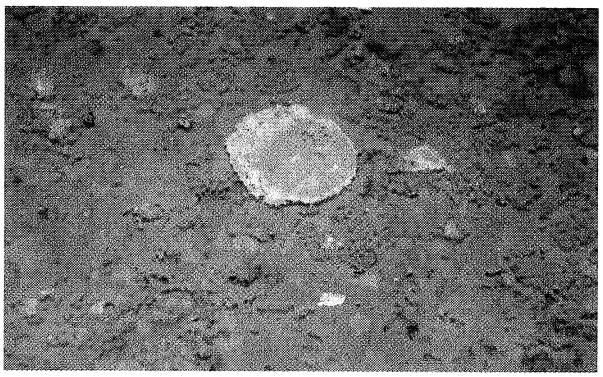
[47] Karstverschijnsel: gesloten valleivormige depressie, samengesteld uit een reeks aaneengesloten dolines, ontstaan door oplossing van de onderliggende kalksteen.

mergelkuilen, tegenover de Waterkuil, is nooit in gebruik genomen. Met het water werden grote hoeveelheden zand (kalkareniet) opgepompt zodat de pomp gedurig verstopte en de boorput onstabiel werd. Is men hier terechtgekomen in de opvulling van een oude grot? Bij ons weten bestaan er geen documenten over deze put.

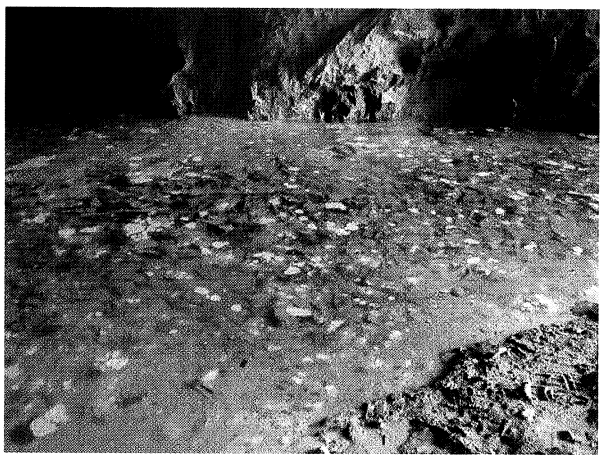
9.3. Drijvende calciet en microklimaat

Grotten worden gekenmerkt door een gelijkmatig microklimaat, met temperaturen die slechts weinig schommelen rond het jaargemiddelde van ca 10° en een vochtigheidsgraad van 100%. De enige mergelgrot die hieraan voldoet is de Champignonskuil, dank zij de nauwe openingen die uitwisseling met de buitenwereld beperkt. Van zodra het portaal zeer groot wordt en de totale diepte van de grot beperkt gaan luchtcirculatie en temperatuurschommelingen toenemen, in dezelfde zin als ook de buitentemperatuur gaat variëren (Tabel 13).

In de Waterkuil drijven op het wateroppervlak talloze melkwitte tot doorzichtige ragfijne plaatjes die erg veel op drijvende ijskristallen gelijken (Figs. 85-86). Ook in de tijdelijke plassen die zich bij hoge grondwaterstand vormen in de andere mergelgrotten komt dit fenomeen voor. Bij verlaging van het grondwaterpeil bleven de plaatjes achter als een knisperende laag op de drooggevallen grond. Ze bestaan uit een samenklontering van kalkplaatjes die tot 10-20 cm doormeter kunnen bereiken. Bij verdere aangroei neemt hun dikte en gewicht toe en zakken ze naar de bodem, waar de groei stopt en ze langzaam terug door het water geresorbeerd kunnen worden. Ze zijn zeer broos maar kunnen toch van het wateroppervlak opgetild worden. Mineralogisch onderzoek heeft uitgewezen dat de plaatjes uit zuivere calciet bestaan (XRD-opname[48]). Het soortelijk gewicht van calciet bedraagt 2,71 g/cm^3. Enkel dank zij oppervlaktespanning blijven ze drijven. Hun kristallisatie vereist de aanwezigheid van stilstaand oververzadigd grondwater en specifieke klimatologische omstandigheden. Een mogelijke verklaring werd aangereikt door Albert Briffoz, die vaststelde dat de luchtcir-



Figuur 85. Drijvende calcietblaadjes op de grondwaterspiegel in Hinnisdael VII (Waterkuil); detail met voorbeeld van samenklontering (foto J. Verspreet).

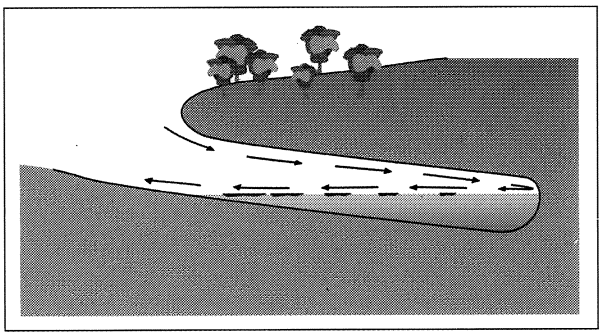


Figuur 86. Drijvende calcietblaadjes op de grondwaterspiegel in Hinnisdael VII (Waterkuil); overzicht (foto D. Lagrou).

datum	grot	buiten	binnen C°	luchtvochtigheid
7.2.91	Hinnisdael I	5°	7°	88%
1.2.92	Hinnisdael II	0°	10°C	100%
1.2.92	Hinnisdael V	0°	6°	83%
1.2.92	Hinnisdael VI	0°	4°	92%
26.1.92	Hinnisdael VII	0°	6°	72%
26.1.92	Hinnisdael VIII	0°	7°	90%

Tabel 13. Temperatuur en luchtvochtigheid (Olefs, Willems & Dahlen, 1992).

[48] X-stralen diffractogram.



Figuur 87. Schematische voorstelling van de relatie tussen microklimaat en vorming van drijvende calciet in de Waterkuil.

culatie in de Waterkuil beperkt blijft tot een nauwe zone onder het dak en over het wateroppervlak, terwijl het centrale deel van de gangen gehuld blijft in een mistbank van stagnerende vochtige lucht (Fig. 87).'s Zomers zal de intrekkende warme en dus lichte lucht tegen het dak van de gangen neerwaarts dalen tot het diepste en verste punt in de grot. Door contact met de koele wanden daalt geleidelijk de luchttemperatuur waarbij condensvocht als fijne druppels tegen de wand blijft hangen. De afgekoelde en dus zwaardere lucht daalt neer tot boven het wateroppervlak en wordt weer richting uitgang gedreven.'s Winters kan het patroon omgekeerd verlopen. Deze luchtstroom draagt bij tot ontgassing van de watermassa en ontsnapping van CO_2. Hierdoor gaat opgelost bicarbonaat in het met kalk verzadigde grondwater aan de waterspiegel onder de vorm van fijne calcietkristalkiemen neerslaan rond fijne stofdeeltjes en verder aangroeien tot vlotters die steeds groter en talrijker worden tot aan de rand van het watervlak, naarmate de onderste luchtstroom een langere weg richting uitgang heeft afgelegd. Zij vallen dus onmiddellijk op voor bezoekers die de grot inwandelen tot aan de rand van het water.

Een vergelijkbaar fenomeen is bekend in stilstaande waterbekkens in natuurlijke grotten, en dan vooral in grotten die gevoed worden door opstijgend grondwater. Deze poelen worden oververzadigd aan kalk. Door CO_2 ontgassing slaat calciet neer tegen de randen van het waterbekken maar ook als drijvende plaatjes, die bij verdere aangroei uiteindelijk zinken en zich op de bodem kunnen opstapelen. Bij uitdroging van de waterbekkens blijven de calcietkristallen en -plaatjes achter die dan verkruimelen tot fijn wit poeder dat als een sluier over de grond blijft liggen (Ford & Cullingford, 1976, p. 299; Ford & Williams, 1989, p. 341).

10. Geologische risico's

10.1. Instortingen: hoe gevaarlijk zijn de ergelkuilen?

De talrijke leembulten en op puinkegels doodlopende gangen tonen aan dat de mergelgrotten geen statisch geheel vormen maar integendeel onderhevig zijn aan verval. Na stopzetting van de mergelwinning zal de toegankelijke ondergrondse ruimte dus gedurig verminderen. Zelfs dakbreuken die tijdelijk het gewelf verhogen zijn de voorbode van instortingen tot uiteindelijk een oppervlakkige doline ontstaat en de vroegere grotgang volledig wordt opgevuld. Op lange termijn (in termen van vele eeuwen) zullen deze unieke natuur-cultuurhistorisch fenomenen dus verdwijnen. De processen, hun oorzaken en mogelijke preventie zijn specifiek voor het Mergelland en Vechmaal maakt hierop geen uitzondering.

Verschillende soorten van instortingen of afstortingen kunnen voorkomen. Het meest hinderlijke want veelvuldig voorkomend is het leegstromen van dolines of geologische orgelpijpen die door de exploitatie aangesneden worden. Rond de Mergelkuilen van Hinnisdael eindigt een respectabel aantal galerijen op dergelijke afgestorte dolinewanden, tevens eindstation bij de exploitatie. Dakbreuken vormen een tweede soort van instortingen. Deze ontstaan in de drukontlastingszone boven het dak, langs rekbreuken of kunnen bevorderd worden door het voorkomen van holruimten tengevolge van karstoplossing in de hardground die als dak fungeert. Dergelijke beperkte instortingen waren allicht het gevaarlijkst voor de blokbrekers; zij hebben hierop geanticipeerd door in instortingsgevoelige zones een parabolische dakvorm aan te nemen. Wanneer door dakbreuk ook de overdekkende zand- en leemlagen gaan afstorten zal het uiteindelijke resultaat vergelijkbaar zijn met de leegstromende dolines. De derde soort is het gevolg van 'kruip', een langzame vervorming onder invloed van het gewicht van de afdekkende lagen (dikte en densiteit als meetbare parameters, waarbij in poreuze lagen waterverzadiging tot extra gewicht en dus belasting leidt). Het Maastrichts tufkrijt begint al te breken in laboratoriumomstandigheden onder een druk van 3,5 Mpa. Door overmatige belasting gaan pilaren barsten en uiteindelijk bezwijken, wat een domino-effect kan veroorzaken en ganse gangenstelsels ogenblikkelijk kan doen instorten. Dit soort van instorting is bijzonder gevaarlijk zoals de ramp in de Roosburg te Zichen-Zussen-Bolder op 23.12.1958 heeft aangetoond (Breuls, 1984; Price, 1992; van Schaik, 1997; Bekendam, 1998; Broos, 1998).

De meest instortingsgevoelige zone van de mergelgrotten is de hellingwand rond de ingang, waar de het dak op zijn dunste is. Boomwortels dringen door tot in de grotten en vallende bomen lichten de grond op en scheuren soms het dak van de mergelgrotten. Vossen, dassen, marters en konijnen graven een netwerk van gangen (en komen zo in de grotten terecht) die, eenmaal verlaten, aanvoerroutes voor met modder beladen water kunnen worden doorheen de anders ondoorlatende deklagen. Ingangsportalen vormen steilwanden, die doorlopen tot in de overdekkende zand- en leemlagen, die voortdurend afbrokkelen en naar beneden glijden en de ingangen zouden obstrueren. Zolang de grot in exploitatie was werd de ingang vrijgehouden, maar eenmaal verlaten zal de ingang onder een puinkegel van losse grond verdwijnen. Zo zijn de toegangen van de Champignonskuil herleid tot nauwe kruipgaten, is de ingang van de Walenkuil, met enige hulp van de eigenaar, dichtgeslibd, en zijn de grote toegangspoorten tot Hinnisdael-VI achter een berg leem en puin verborgen. De toegang tot deze grot bestaat nog, enkel omdat het te gevaarlijk werd vanaf het land boven de grot stortafval te dumpen (persoonlijke mededeling Julien Geuten). Op kleinere schaal zijn ook verluchtingskokers gebruikt als stortplaats, bijv. in de Champignonskuil. Met afval is ook de leem naar beneden verschoven zodat deze koker grotendeels ingestort is en op een doline gaat lijken.

Natuurlijke dolines, waarin de bovenste kalklagen zijn opgelost en de deklagen geleidelijk in verzakken, komen veelvuldig voor in het Mergelland. Ze zijn dieper in de berg herkenbaar als geologische orgelpijpen of aardpijpen (zie hoofdstuk karst). Bij vorming van oplossingsdolines ontstaan geen open ruimtes: oplossing wordt gecompenseerd door subsidentie die dan weer gecompenseerd kan worden door aanvulling met leem en aarde vanuit de onmiddellijke omgeving (of door tongeriaanzand in het verleden). Anders ligt het wanneer de wortels van een doline of een orgelpijp worden aangesneden door een galerij en gaan verglijden. Die galerij kan dan opgevuld raken door de lemige massa. Bij fossiele dolines met ondoorlatende, redelijk gecompacteerde opvulling door Tertiaire gesteentelagen blijft het risico op verglijdingen in de galerijen beperkt. Dit is eveneens het geval bij kleinere oneffenheden in de top van de krijtlagen die door differentiële oplossing en erosie aan dit topvlak wordt veroorzaakt. Waar het Krijt-Tertiair contact naar onder verschoven is, meestal in de vorm van kleine dolines met platte bodem, ontstaat in de galerij een venster op het bovenliggend zand dat voldoende cohesie bezit om in het dak te blijven hangen indien ten minste de doormeter van de orde van grootte van 1 m blijft (dit tongeriaanzand werd niet voor niets als plakzand gebruikt). De uiteindelijke afstorting zal leiden tot een gangvullende puinkegel, maar niet noodzakelijk tot een instortingstrechter aan de oppervlakte. Sommige natuurlijke dolines hebben echter doormeters op decameterschaal. Een ganse reeks galerijen kan hierop doodlopen indien een deel der vulling wegzakt, wat bij de grootste dolines uiteindelijk zal gebeuren. Dit zijn echter niet de gevaarlijkste fenomenen omdat de afstorting (in feite een verglijding of modderstroom) zich vooraf aanmeldt en slechts een beperkte oppervlakte bestrijkt, afhankelijk van de grootte van de doline en de intersectie met de galerij. De noordwestelijke uitbreiding van de Champignonskuil, berginwaarts, is zo gestopt door het veelvuldig voorkomen van oplossingsdolines.

De geringe dikte van de tufkrijtlaag in het dak van de galerij - soms minder dan een meter onder de overdekkende zand-en leemlagen - en de fijne barsten die openscheuren, door drukontlasting of door verlies van frictie bij waterverzadiging of bij opvulling van barsten door kleiig zand, vormen een stabiliteitsprobleem dat plotse instortingen kan veroorzaken, lang nadat de galerijen gedolven zijn. Door het gewicht van de afdekkende lagen, soms nog verzwaard door bodemwater in periodes van langdurige regenval of tijdens natte winters of bij extra belasting veroorzaakt door steeds zwaarder wordende landbouwvoertuigen, kan de reeds gescheurde en dunne tufkrijt-deklaag begeven. Een plotse, gelokaliseerde instorting van het dak gebeurt en kan zich stapsgewijs tot aan de oppervlakte voortzetten. Dit proces gebeurt zeer snel – op enkele minuten of uren tijd – wanneer er geen cohesieve lagen boven het dak van het tufkrijt voorkomen of wanneer deze lagen door waterverzadiging hun cohesie verliezen, maar kan ook gedurende jaren onderbroken worden onder een compacte samenhangende deklaag (Dusar & Hammenecker, 1993). Een metersdiep gat met verticale wanden ontstaat aan de oppervlakte. Dergelijke instortingsdolines[49] komen voor op de hellingwand tussen Hinnisdael I en de Champignonskuil. De galerijen worden plots gevuld met materiaal afkomstig uit de instorting. Deze fenomenen doen zich niet alleen voor boven bekende grotten maar zijn des te gevaarlijker wanneer ze optreden op plaatsen waar de grotten niet meer toegankelijk of bekend zijn (Dusar & Lagrou, 2000). Een voorbeeld is het naburige Horpmaal. De krant *Het Belang van Limburg* blijkt de voornaamste, mogelijk zelfs enige betrouwbare informatiebron over instortingen die zich in het recente verleden in de velden van Horpmaal, doorgaans in het ploegseizoen, hebben voorgedaan. De boeren hebben er immers alle belang bij die gaten zonder pottenkijkers te dichten. Er bestaan dan ook meestal geen technische verslagen door de gemeente, verzekering of

[49] Instortingsdolines ontstaan door verzakking van de bovengrond ter vulling van een onderliggende holle ruimte, en verschillen dus van oplossingsdolines die ontstaan door volumevermindering ten gevolge van kalkoplossing.

Mijnwezen[50] die enkel in actie treden wanneer er (kans op) slachtoffers bestaat. Doch ook in Vechmaal is dit soort instorting bekend. Enkele gevallen worden aangehaald in Dewelf et al. (1978, p. 399-402) en hieronder samengevat.

Het oudste geciteerde maar niet verifieerbare voorval dateert van 27.12.1636, waarbij alle bewoners van Hinnisdael om het leven zouden zijn gekomen. Dit kan natuurlijk niet gaan om de instorting van een nu nog bestaande grot, maar mogelijk om een grottencomplex gelegen onder de veronderstelde, vroegere Hinnisdaelwinning in wat nu de Mergelkuilen zijn (de rechthoekige depressie of de toegang daartoe vanaf de Borgstraat).

De jaren 1968-1969 waren het einde van een regenrijke periode. Talrijke instortingen hebben zich toen voorgedaan in de velden. Op 24.12.1969 ontstond daags nadat landbouwer P. Picard er herhaaldelijk met zijn tractor over was gedraaid een instortingstrechter van 2 m breed en 8 m diep op enkele meters van de betonnen verbindingsweg tussen Vechmaal en Wouteringen, de St.-Martinusstraat (toen nog Haagstraat genoemd), op bijna 500 m afstand van de Mergelkuilen. Het Mijnwezen stapte ter plaatse af en kon vaststellen dat de instorting zich bevond boven op een snijpunt van galerijen, waarvan drie gangen doodlopend op een productiefront. Het is weinig waarschijnlijk dat deze grot ooit verbonden was met bijv. Hinnisdael I in de Mergelkuilen (wat de grootte van deze grot vergelijkbaar zou maken met de reusachtige gangenstelsels onder de St.-Pietersberg en de Cannerberg). Anderzijds lag er in de buurt een plaats, kadastraal bekend als "Happart Fosseit", wat mogelijk kan wijzen op een oude toegang tot mergelgrotten. Ook na 1969 zijn er in het veld nog kleinere instortingsholtes ontstaan, weliswaar metersdiep maar ogenschijnlijk geen vrije toegang gevend tot de onderaardse gangen die er ongetwijfeld moeten zijn. De grotten van Hinnisdael of de vroegere grotten van de Patrijnenkuil zijn dus niet de enige die er in Vechmaal ooit bestaan hebben. Nu is er in het landschap niets meer te bespeuren van het verdoken onderaards domein.

Ook langs de Mergelkuilen van Hinnisdael zijn belangrijke modificaties van de gangenstelsels door instortingen vast te stellen. Een grote en diepe doline ("Vossenkuil") bevindt zich in de zuidoosthoek van de Mergelkuilen en snijdt de Champignonskuil af, waarvan het gangenstelsel oorspronkelijk verder naar het zuiden doorliep. Deze instorting moet al oud zijn, want de wanden van de doline zijn afgeschuind en de bodem verzakt tot op het niveau van de ondergrondse galerijen. Onder deze doline zijn de gangen dus volledig ingestort. De Champignonskuil heeft mogelijk tot 40% t.o.v. het overgebleven volume verloren door deze grote instortingszone. Het is grotendeels via deze doline dat de Champignonskuil dichtslibt. Twee galerijen die vanuit de Champignonskuil in de richting van de doline lopen en op opvullingen eindigen maken desondanks toch nog enig contact met het daglicht in de wand van de doline. Een hiervan is vermoedelijk het werk van gravende dassen en de andere fungeert als karst-verdwijngat, en beide zijn niet toegankelijk voor mensen.
Langs de zuidkant van de ingang tot Hinnisdael I bevinden zich twee grote dolines met steile wanden, waarvan de bovenste, meer dan 5 m diep tot aan de rand van het veld reikt. Deze zijn niet zo oud en nog niet dichtgegroeid, waarschijnlijk ontstaan sinds 1968, maar niet tegelijkertijd en niet gedocumenteerd (persoonlijke mededeling Julien Jorssen). Grote dolines kunnen in het bos quasi onopgemerkt ontstaan. Door deze dolines is de huidige ontwikkeling van het Hinnisdael I-gangenstelsel asymmetrisch t.o.v. de ingang en is de oorspronkelijke verbinding met de Champignonskuil afgesneden.

Op meerdere plaatsen zijn de pilaarwanden of het dak onder invloed van de gesteentedruk gescheurd en onregelmatig van vorm. Wrijvingskracht houdt het geheel samen, maar kan gemakkelijk verstoord worden, bijv. door gravende dieren of fossielenjagers. Kleine afstortingen zijn dan het gevolg, die nauwelijks effect hebben op het geheel maar toch potentieel gevaarlijk kunnen zijn voor de dader of de persoon die na hem komt.
Dakbreuken kunnen ontstaan door extra belasting van de deklagen of na voorafgaandelijke uitbraak van dak of wanden van de galerij, of door scheurvorming ontstaan bij drukverplaatsing ten gevolge van naburige instortingen. Dakbreuken kondigen zich aan door kraken en doorbuigen van het dak. Ervaren berglopers lopen dus weinig gevaar. De meeste dakbreuken blijven beperkt tot de verplaatsing van enkele m^3 grond met plaatselijke opstopping van de galerij onder het doorbraakpunt dat al vanaf het begin een zwak punt was. Het is om deze redenen dat veel gangen doodlopen op een puinkegel van ingestorte grond. Wanneer die komt van een geologische orgelpijp is het ontstaan vroegtijdig, tijdens of kort na de exploitatie, en draagt bij tot stabilisering van zijn omgeving. In zeldzame

[50] De Administratie van het Mijnwezen, opgericht onder Napoleon en voor de staatshervorming van 1989 ressorterend onder het nationale Ministerie van Economische Zaken was bevoegd voor toezicht op productie en veiligheid van mijnen, groeven en graverijen, dus ook de groeven waartoe de mergelgrotten werden gerekend. Door de staatshervorming is het Mijnwezen afgeschaft; zijn restbevoegdheden werden overgedragen aan het Bestuur Kwaliteit en Veiligheid van de Federale Overheidsdienst Economie, KMO, Middenstand en Energie. Dit heeft wel tot gevolg dat er in dit land geen overheidsinstelling meer is die zich om de technische inspectie van de mergelgrotten zou kunnen bekommeren. Naar Nederlands voorbeeld moet deze opdracht als geprivatiseerd worden beschouwd (contact: Bekendam Geotechniek, Maastricht).

gevallen, maar wel dikwijls gegroepeerd voorkomend in de tijd, bijv. na een periode van zware regenval, kunnen grotere, doorgaans waterverzadigde hoeveelheden grond in een reeks instortingsdolines afstorten en door het vrije water gaan vervloeien. Zo wordt de grond over grotere afstand uitgespreid en worden galerijen effectief verzegeld. Dergelijke gebeurtenissen vallen samen met verhoogde grondwaterstanden en acute overstromingsrisico's. Dit zijn niet de meest geschikte momenten om een grot te bezoeken.
De grootste risico's doen zich voor waar drukontlastingsscheuren over grotere afstand volgens de lengterichting van de galerijen voorkomen. Dit is bijvoorbeeld het geval voor de ingang van Hinnisdael I. Alleen regelmatige controle van de scheuren in het dak van de toegangsgalerij kan uitmaken of de veiligheidstoestand stabiel blijft dan wel verslechtert.

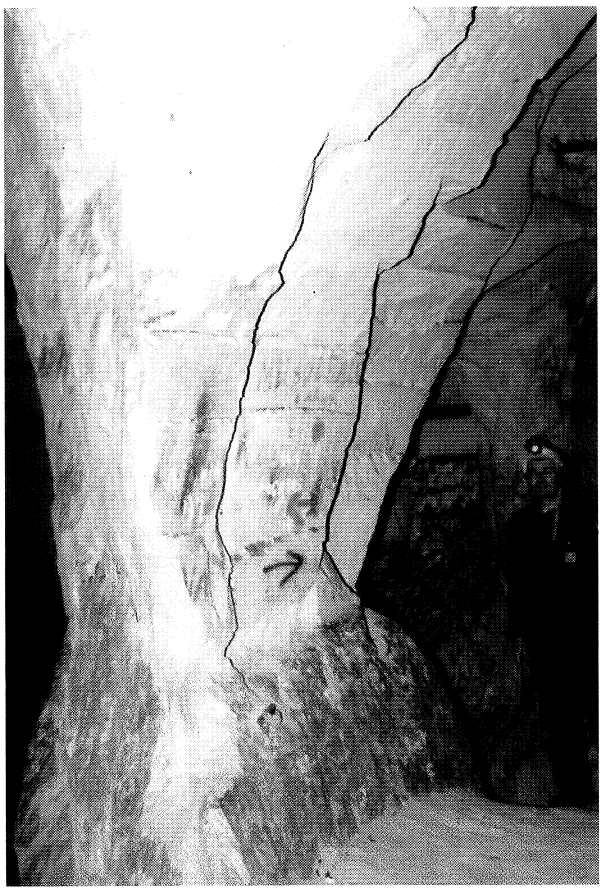
De echt gevaarlijke rampen zoals die van 23.12.1958 in de Roosburg te Zichen-Zussen-Bolder zijn te wijten aan het plotse bezwijken van de pilaren ('pillar failure'). Deze ontstaan onder invloed van kruip, een langzame vervorming van de pilaren onder druk veroorzaakt door het bovenliggend gesteentepakket. De verslechtering van de mechanische sterkte van de pilaren is pas decennia of eeuwen na de exploitatie voldoende gevorderd om tot plotse en grootschalige instortingen te leiden. Kruipgedrag wordt bepaald door dikte en dichtheid van het bovenliggend gesteentepakket. Risicofactoren zijn bovendien een grote hoogte van de galerijen (> 4,5 m, in het geval van Vechmaal de verdiepte zones door afgraving van het onderste vuursteenhoudend pakket voor mergelwinning), te kleine doorsnede van de pilaren t.o.v. de omgevende afgegraven oppervlakte ('tributary area') of roofbouw van de pilaren waardoor het dragend deel van de pilaar uiteindelijk onvoldoende dikte heeft (Fig. 88). Waterverzadiging, wat voornamelijk zal optreden tijdens langdurige regenperioden in het winterseizoen, wanneer evapotranspiratie tot een minimum herleid is, draagt eveneens bij tot vermindering va de mechanische sterkte. Het gesteente in de pilaren wordt immers zwaarder belast en samengedrukt, gaat 'pitsen', en niet dragende delen scheuren af. Meerdere pilaren onder dezelfde toestand kunnen door scheurvorming zijn aangetast. Het bezwijken start op één pilaar die verzwakt is, bijv. door afkalven van de wand of afschuren door karren- of tractorwielen, en dan onder het gewicht schuinstaande scheuren[51] gaat vertonen. Die zijn zeer gevaarlijk wanneer ze naar buiten afhellen. Dergelijke scheuren kunnen als schuifvlakken fungeren, waarbij het bovendeel van de pilaar en het dak dat hij draagt plots zal afschuiven en de resterende stomp verbrijzelen. Soms stopt deze beweging even plots als hij begonnen is, na enkele centimeters verplaatsing, maar er blijft een zeer gevaarlijke situatie bestaan, goed herkenbaar aan

Figuur 88. Uitholling door roofbouw voor mergelwinning aan de voet van de pilaren in de toegangsgalerij van Hinnisdael I (foto J. Frankie).

de zandlopervorm van de pijler (Fig. 89). Indien echter een pilaar helemaal begeeft wordt de krachtverdeling ogenblikkelijk herschikt en de nevenstaande pilaar extra belast zodat die ook zal bezwijken en er een domino effect optreedt. Er zijn gevallen bekend waarbij tientallen pilaren als een kaartenhuisje in elkaar gestort zijn (Breuls, 1984; Price, 1992; Bekendam, 1998; Broos, 1998). Grote delen van een grot storten ogenblikkelijk in. De drukgolf die hiermee gepaard gaat is een zware ontploffing gelijk en kan nog slachtoffers maken tot buiten de grot.

Gevallen van pilaarbezwijking gaan echter vooral optreden in grotten die op grotere diepte onder de oppervlakte voorkomen, waar bijvoorbeeld nog tientallen meters tufkrijt, zand en leem in het dak voor extra belasting zorgen. Dit is in Vechmaal niet het geval, ten minste niet in de nu nog bekende grotten die allemaal heel oppervlakkig liggen, weliswaar met één uitzondering: rond de grote ruimte noordelijk (rechts) van de ingang van Hinnisdael I waar een pijler op het kruispunt van hoofdgalerijen bezweken is en bijna volledig opgeruimd

[51] Niet te verwarren met natuurlijke breukvlakjes of diaklazen die reeds lang voor de mergelwinning in het gesteente aanwezig waren.



Figuur 89. Pilaar in zandlopervorm, verzwakt door verdieping van de galerij en gedeeltelijke instorting van het dak aan de linkerzijde van de pilaar, zicht vanop de 'Rue de Paris', Hinnisdael I (foto J. Frankie).

als mergelgrondstof, maar waar het dak het (nog) niet begeven heeft, zoals aangegeven door zandlopervervorming in een aangrenzende pilaar (zie figs. 61, 89). Dit relatieve voordeel van Vechmaal is te wijten aan zijn geografische positie, bij de waterscheiding tussen Maas en Schelde, zodat de rivieren niet diep ingesneden zijn en het grondwater onder de heuvels vrij hoog staat. Tegenover dit veiligheidvoordeel staat dan wel het onderhoudsnadeel dat de wanden erg gescheurd en onstabiel zijn en de deklagen zeer nabij, zodat kleinere instortingen meer frequent kunnen voorkomen. Preventieve maatregelen tegen het bezwijken van pilaren zijn, naast de regelmatige controle van het scheurenpatroon en vooral van de horizontale verplaatsingen in de pilaren zelf of tussen het dak en de pilaar, het aanbrengen van een opvulling tegen verzwakte pilaren (door leem of een stenen constructie). Wanneer het veiligheidsrisico acuut is en niet beperkt tot één enkel zwak punt past desnoods de volledige afsluiting van de grot (Price, 1992).

Deze observaties gelden voornamelijk voor de grotten rond de Mergelkuilen van Hinnisdael waar de Kalksteen van Nekum in galerijen met rechte wanden en vlakke daken geëxploiteerd werd. De grootste veiligheidsrisico's lijken voor te komen in de ingangszone van Hinnisdael I. De Waterkuil daarentegen is meer stabiel en instortingen zijn er nauwelijks te bespeuren, tenzij dan tegen de buitenwand om de hierboven aangehaalde redenen. Die grotere stabiliteit is te danken aan het boogvormige profiel van de galerijen dat in een meer gelijkmatige belasting resulteert, de geringere hoogte van de galerijen en de beter gecementeerde horizonten in de Kalksteen van Meerssen (die dan weer niet als bouwsteen geschikt waren en daarom op eenvoudiger wijze geëxploiteerd mochten worden). De Waterkuil is dus veiliger voor bezoekers die overigens door de hoge waterstanden extra gehinderd zullen worden bij potentieel gevaarlijk vandalistisch gedrag.

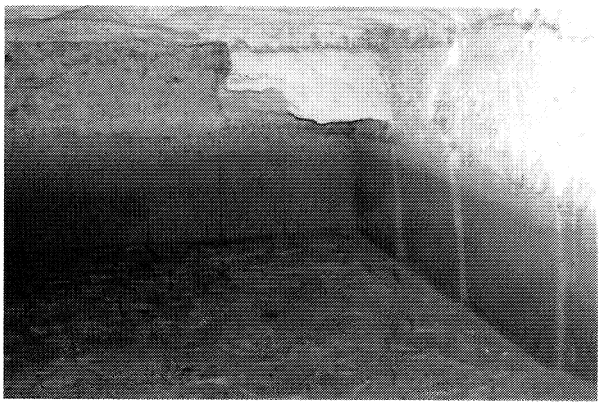
10.2. Opvulling van de Champignonskuil

De Champignonskuil is een buitenbeentje in het grottenstelsel van Hinnisdael. Niet zozeer wegens het kruipgat als ingang, terecht de Vossenkuil genoemd[52], maar wel omdat de galerijen overal zeer laag zijn, van zowat 80 cm tot 2 m hoog, daar waar de andere grotten langs de Mergelkuilen 5 tot 7 m hoogte halen (gebeurlijk minder op puinkegels van instortingen of in onvolledig geëxploiteerde galerijen). Nochtans is de Champignonskuil op dezelfde wijze geëxploiteerd, dus hoofdzakelijk als bouwsteengroeve met gezaagde rechte wanden, met vlak of paraboolvormig dak. Op meerdere plaatsen ziet men ter hoogte van de vloer brede inkepingen van de zijwanden, duidelijk het dak van lagere dwarsgalerijen. De Champignonskuil is dus oorspronkelijk dieper geweest maar opgevuld. Hoe, waarom en wanneer dit gebeurd is kan niet in de bestaande literatuur of de lokale overlevering worden teruggevonden. Vermits er geen aanwijzingen zijn dat dit proces is gestopt en bijgevolg de grot door volledige opvulling zou kunnen verdwijnen werd enige aandacht aan dit fenomeen van sedimentatie besteed.

De zware regenval van begin juli of begin september 2005, tijdens de periode van het veldwerk, heeft nochtans nergens geleid tot waterpercolatie, noch tot activatie van een modderstroom. Dit stelt vragen enerzijds over de voeding van de krijtaquifer: 7 m leem en 1 m tongeriaanzand volstaan blijkbaar als afsluitende laag. En anderzijds over tijdstip en snelheid van de opvulling. De laatste modderstromen zullen niet meer dan enkele jaren oud zijn, te oordelen naar enkele scherpe voetafdrukken in verse, nog steeds slappe modder. De meest modderige gedeelten van de grot zijn weinig verstoord door bezoekers en vertonen

[52] Oude foto's gemaakt voor Wereldoorlog II ten tijde van de champignonteelt tonen een meer dan manshoge ingang afgesloten door een houten poort (Dewelf et al., 1978 foto 209).

Figuur 90. Schimmelvorming door aanvoer organische detritus samen met het opvullingsslib in Hinnisdael II; doormeter ca 70 cm elk (foto M. Dusar).



Figuur 91. Slibafzetting met recente droogtescheuren in geïsoleerd oostelijk gangenstelsel van Hinnisdael II (Champignonskuil), op 100 m afstand van het zuidelijk verdwijngat (fig. 95). De hoogwaterlijn op de wand, in dezelfde bruine modderkleur als op de vloer van de kamer, reikt tot 50 cm boven de bodem (foto M. Dusar).

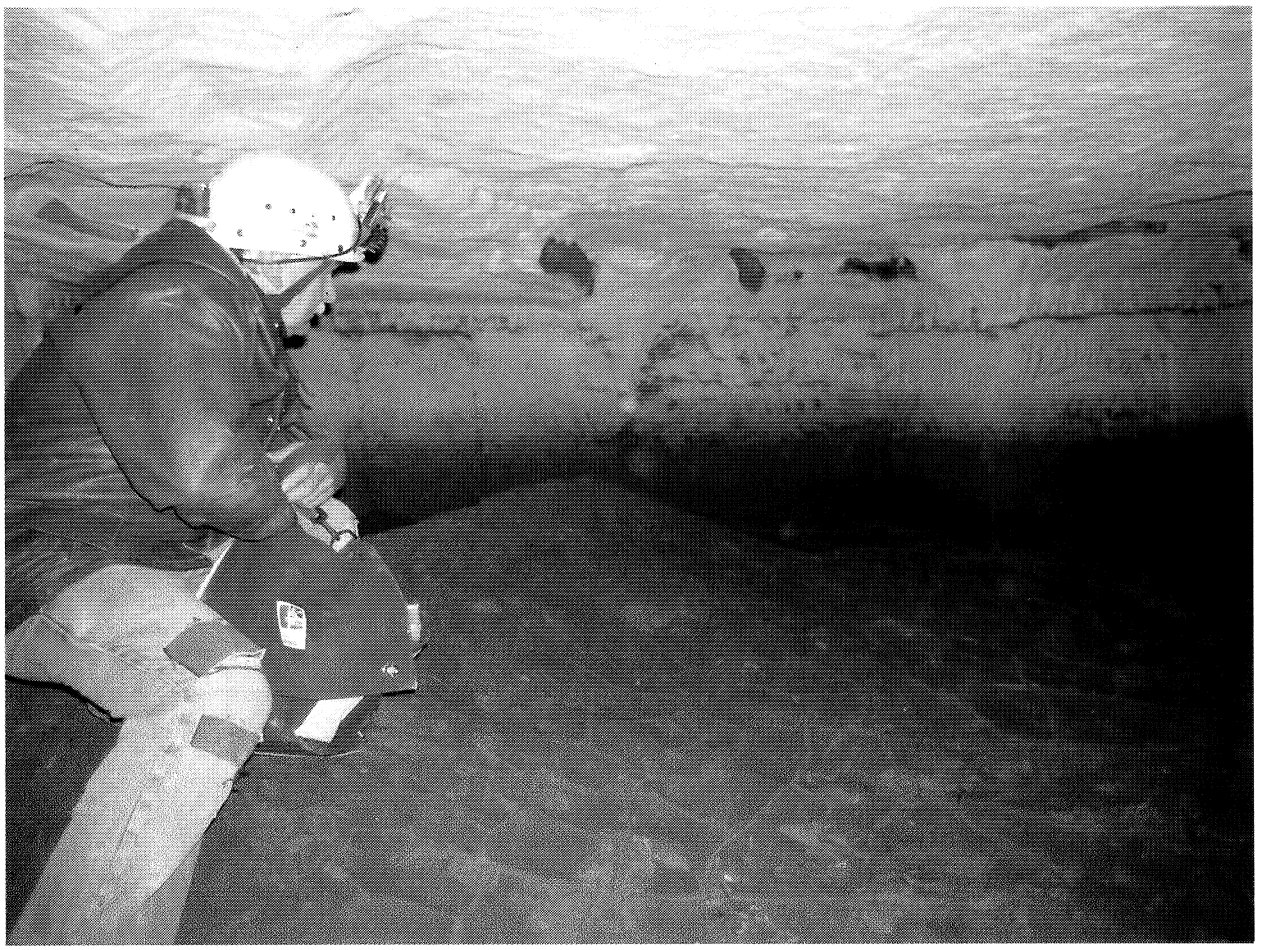
polygonale droogtescheuren en/of prachtige dendrietische of bolvormige patronen van schimmeldraden die zich gangbreed hebben kunnen ontwikkelen over de bodem (bedekt met veel meegesleurde takjes en dorre bladeren, waarmee zodoende klaarheid heerst over de voedingsstoffen voor de schimmels)-(Fig. 90).

De oorsprong van de beken en dus de aanvoer van water en mogelijk ook van het opvulmateriaal is beperkt tot enkele instroompunten, van waaruit praktisch de hele grot doorstroomd of overstroomd wordt. De bodem is dus niet helemaal gelijk en zal het hoogst zijn bij de instroompunten, geleidelijk verlagen volgens de loop van de beekbeddingen en het laagst zijn in de modderige aanslibbingszones. In de zones met modderafzetting is de hoogte van de overstroming goed af te lezen op de wanden. Twee verschillende peilen werden vastgesteld: een donker-leembruine band die tot 80 cm hoog kan reiken (en dus op een aantal plaatsen tot het dak reikt), en een licht leembruine band 20 cm hoger en waarschijnlijk overeenkomend met een uitzonderlijk overstromingspeil (Figs. 91-92). Deze banden staan in verband met overstromingen en niet met veranderingen in grondwaterpeil: het grondwaterpeil werd enkel bereikt in de diepste handboring die doorheen de opvulling werd uitgevoerd en staat zoals verwacht kon worden niet hoger dan de diepste uitgravingen. De opvulling is sterk lemig en blijft in deze omgeving steeds vochtig maar niet nat: het instromingswater kan doorheen de losse kruimelige opvulling snel wegzijgen omdat de grondwaterspiegel veel dieper staat. Percolatiewater dringt hier trouwens ook niet door zodat regelmatige voeding van de grondwaterlaag van bovenaf ook niet gebeurt.

De droge beekbeddingen aan de bovenkant van de opvulling vertonen mooie mini-fluviatiele patronen van vlechtende rivieren: splitsing in geultjes, rivierbankinsnijding, stroomribbels, flute casts. De soms talrijke silex-rolkeien zijn herwerkt uit het Quartaire basisgrind dat door instortingen in de grot is terechtgekomen, maar toch over tientallen meters is meegesleurd. De muurtjes die soms dwars op de gangen zijn opgebouwd (Fig. 93) en de dijkvormige opvulling van sommige lage zijgangen hadden ongetwijfeld als bedoeling deze stroming af te leiden, een aanwijzing dat de grot in gebruik was voor champignonkweek wanneer de opvulling reeds grotendeels tot stand was gekomen[53]. Ook zijn er aanwijzingen dat puinkegels van instortingen deels weggeschupt werden en als banken op de zijkanten van de gang als verhoogd champignonbed uitgespreid.

Drie handboringen werden uitgevoerd met de Edelmanboor om de samenstelling en het mechanisme van de opvulling beter te kunnen begrijpen (Tabel 14). De uitvoering werd bemoeilijkt door de beperkte vrije hoogte van de gangen waardoor de boor bij iedere ophaling gedemonteerd moest worden. Het boren doorheen de opvulling verloopt vlot en het contrast met de kalksteen in-situ die de onderkant van de galerij markeert is onmiskenbaar. Het is onmogelijk om met de Edelmanboor het tufkrijt te doorboren, ondanks de schijnbare zachtheid van dit

[53] De centrale waterbak, waarlangs handboring B1 werd uitgevoerd, laat toe te veronderstellen dat de opvulling nog minstens 14 cm moet zijn verhoogd sinds de aanleg ervan.



Figuur 92. Slibafzetting met recente droogtescheuren in oostelijk gangenstelsel van Hinnisdael II (Champignonskuil). De bruine siltige modder overdekt leembulten achtergelaten door de champignonkwekers. De vuursteenknollen tegen het dak kenmerken het niveau vlak onder de Horizont van Kanne (foto L. Willems).

Figuur 93. Spoor van beekbedding, aangegeven door donkere sliblaag, aangerijkt met organisch materiaal en enkele meegesleurde keitjes, omgeven door lemige opvulling met droogtescheuren. De beekbedding doorbreekt een dammetje van snelbouwstenen aangelegd door de champignonkwekers. Hinnisdael II (foto L. Willems).

gesteente. Vermoedelijk is het onderscheid tussen recente opvulling en Krijtgesteente te wijten aan de klei- of leemfilm rond de sedimentkorrels van de opvulling. Boren in het tufkrijt produceert een kretsend geluid, te wijten aan het breken van de kalkcementbruggen tussen de korrels. Het verpulverde losse kalkareniet valt daarenboven uit de boor terug op de bodem van het boorgat wat het verder verdiepen bemoeilijkt.

De totale hoogte van de galerijen vóór opvulling kan 5-7,5 m bedragen (som opvulling en vrije hoogte van de gang), net zoals in de andere grotten rond de Mergelkuilen, maar was ongelijk en soms beperkt tot 4-5 m, maar dan wel gelegen in de bovenste zone van de kalksteen van Nekum, met de beste bouwsteen. Vermits de top van de exploitaties zich hier rond de Horizont van Kanne situeert zullen de galerijen met de grootste oorspronkelijke hoogte dus zijn afgediept tot aan de basis van de onderste silexlaag, net zoals in Hinnisdael I en de Hussenkuil. Als praktische basis voor de exploitatie gold overigens de grondwatertafel, net zoals in Hinnisdael I.

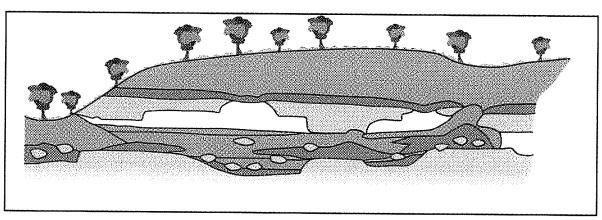
Boring 1 naast centrale waterbak	
Dak extra verhoogd langs gecementeerde barst; vrije hoogte max. 2,47 m ▯ totale hoogte voor opvulling 7,47 m	
0,00-0,55	los beigebruin lemig zand vol kalkgruis (bioklasten)
0,55-0,75	grotere kalksteenblok
0,75-1,90	bleker beigebruin lemig zand met kalkgruis en wat grotere witte kalksteenbrokjes op mm tot cm schaal
1,90-2,35	compacte bruine leem, soms licht kneedbaar
2,35-2,95	beigebruin lemig zand vol kalkgruis
2,95-3,05	sterk kleiige bruine leem
3,05-3,85	licht kleiig kalkgruis
3,85-4,10	geleidelijk leemrijker, licht kneedbaar, zonder kalkgruis
	op 4,05 fijn anthracietglanzend zwart pulverig steenkoolbrokje (0,5 cm) in leembruin zand
4,10-4,25	groenig Tongeriaanzand met fijne roestbruine strepen, scherp afgelijnd in het zand
4,25-4,60	afwisseling licht zandig-lemig kalkgruis en meer kleiige leem in banden van ca 15 cm dik
	vanaf 4,50 vochtig, kleiig aanvoelend, maar blijft lemig relatief bleek kalkgruis
4,60-5,00	kleiige leem, vrijwel zonder kalkgruis, en met hoger vochtgehalte (grondwater)
5,00-5,10	plotse overgang naar zeer hard, bleekbeige kalkgruis, met dikke oester en echinidenschalen, zonder kwartszand of leembijmenging (tufkrijt in-situ)

Boring 2 tussen noordelijke instortingsdolines	
Dak gedeeltelijk ingestort en dus verhoogd; vrije hoogte max. 2,56 m ▯ totale hoogte voor opvulling 5,96 m	
0,00-1,50	los beigebruin lemig kalkgruis, wordt vrij compact
1,50-1,95	afwisseling lemige bandjes en mm-dikke kalkgruislaagjes met lemig bindmiddel;af en toe brokjes bleke kalksteen (<0,5 cm), naar de basis wat losser (meer kalkgruis)
1,95-2,15	grote kalksteenblok
2,15-2,30	lemiger, vol kalkgruis; blijft hard boren
2,30-2,50	wordt kleiiger; met witte kalkbrokjes van cm-grootte en zeer hard (heerd)
2,50-2,70	meer zand en fossielgruis, met silex rolkeitje (<1 cm)
2,70-3,00	gevlamd groenig zand met bruine roeststrepen, met bleke verweerde kalkbrokjes; op 2,85 m silexkeitje
3,00-3,25	bruine compacte, zandrijke leem
3,25-3,40	minder zand, meer lemig kalkgruis
3,40-3,75	compacte harde bleke kalksteen, kurkdroog (tufkrijt in-situ)

Boring 3 bij ingang	
Vrije hoogte max. 1,84 m ▯ totale hoogte voor opvulling min 4,97 m	
0,00-3,33	beigebruim, licht vochtig, licht lemig, zeer fijn zand tot silt met cm-dikke meer kleihoudende passages, soms met zachte fijne tufkrijt brokjes; op 3,00 iets grover zand

Tabel 14. Hinnisdael II (Champignonskuil), beschrijving handboringen, met diepte-intervallen aangeduid in centimeter. Lokalisatie zie fig. 95.

De samenstelling van de opvulling vertoont weinig variatie en bestaat uit drie hoofdcomponenten: bruine leem (met af en toe een silex rolkeitje), groengrijs tongeriaanzand en bleekbeige kalkareniet (fijn stof en gruis dat normaal de bodem van de galerijen bedekt, soms in grotere blokken, en ook wat witte harde heerd, afkomstig uit het harde dak van de galerijen)-(Fig. 94). Het geheel ziet er overwegend lemig uit door de fijne kleifilm rond een groot deel der zand- en kalkarenietkorrels. Deze film is een bewijs voor transport door modderstromen. Kleirijke leembandjes van enkele cm tot 20 cm dik komen regelmatig voor en wijzen op intermitterende opvulling. In een lemige zandlaag werd een brokje anthraciet gevonden, als enige allochtoon element. Groengrijs gekleurd zand wordt voornamelijk aangetroffen in de onmiddellijke omgeving van dakbreuken. De lokaal belangrijke hoeveelheden bleekgekleurde kalkareniet met grotere kalksteenblokken die in de opvulling ingelast zijn doen denken aan de normale zanderige bodem van niet dichtslibbende grotten. Dit zou kunnen betekenen dat er ten minste lokaal gedurende langere perioden normale werkomstandigheden konden heersen en de grotten verder geëxploiteerd werden, nog na de eerste overstromingsfasen. Aanwijzingen voor menselijke activiteit werden echter niet gevonden, maar daarvoor zijn de boorgaten misschien te smal.

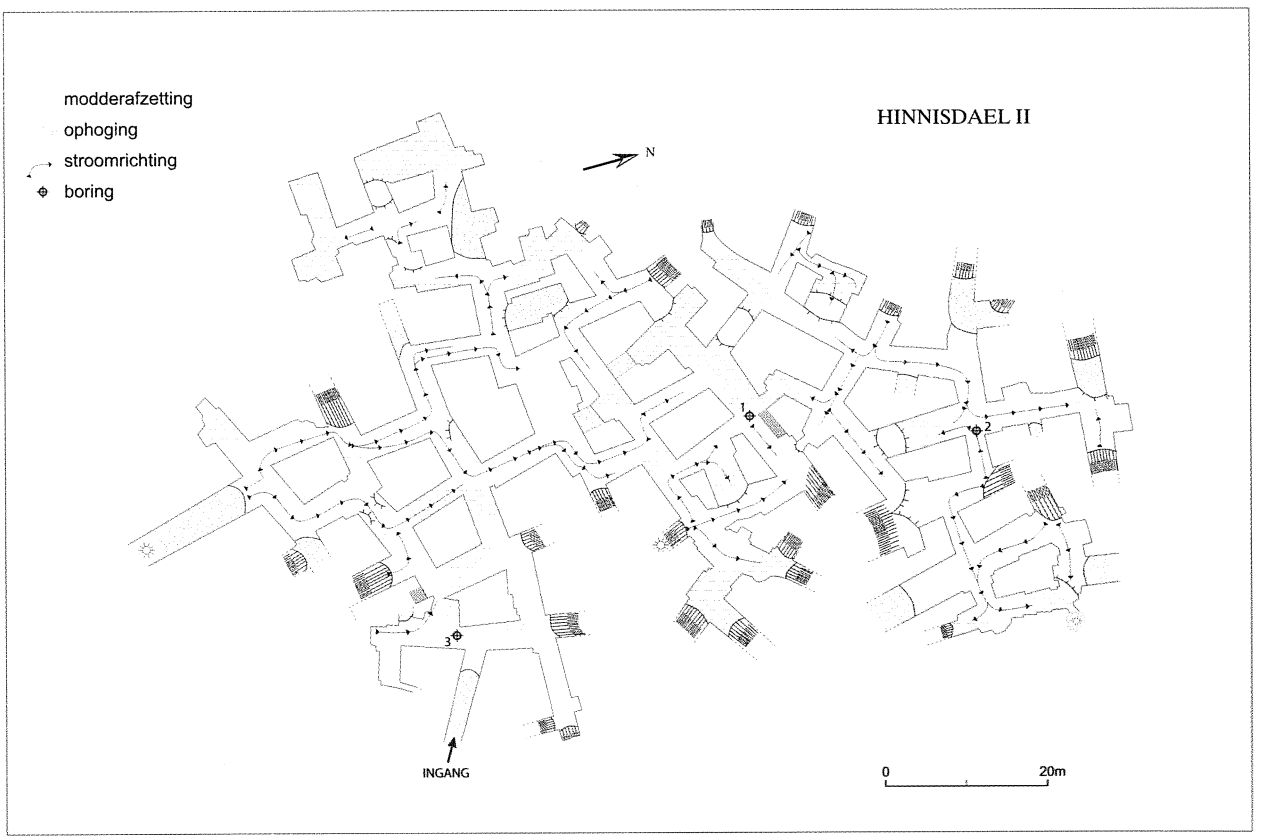


Figuur 94. Schematische weergave van de opvulling van Hinnisdael II (Champignonskuil), met leem en lemig slib (bruin), tongeriaanzand als afdekkende laag en in instortingsdolines (groen) en kalkareniet in pilaren en dak, en als blokken in de bodemopvulling (geel).

Meegesleurd organisch materiaal zoals nu nog overal waar te nemen is aan de oppervlakte van actieve instromingsgeulen krijgt voldoende tijd om te oxideren en wordt niet meer aangetroffen in het sedimentpakket. De ophoging verloopt dus niet snel en zuurstof kan in de bodem doordringen.

Leem, plantenresten en puin allerhande worden uit instortingszones tot in de grot gebracht, o.a. ook vanuit de momenteel ingestorte verluchtingskoker die tevens voor dumping van KGA, waaronder voornamelijk veterinaire preparaten, werd gebruikt. Aangesneden dolines of orgelpijpen zijn een bron voor tongeriaanzand. In de meeste gevallen blijft dit puin als een puinkegel liggen aan de voet van de instorting, tenzij meegevoerd door modderstromen die van elders in de grot aangevoerd worden. Effectieve sedimentbronnen voor de opvulling van de grot zijn immers vier actieve instortingstrechters (Fig. 95). Van hieruit vertrekken echte beekbeddingen die voldoende water kunnen aanvoeren om de gehele grot onder water te zetten en die de opvulling van de grot gelijkmatig kunnen uitspreiden. De voornaamste sedimentbron, goed voor opvulling van de zuidelijke helft van de Champignonskuil, is de complexe instortingszone ten zuiden van de grot, deels in gebruik als dassenburcht maar voorzien van een verdwijngat, dat vanaf de oppervlakte niet te onderscheiden valt van natuurlijke verdwijngaten in echte karst. Dit verdwijngat verschaft een daglichtopening in een ingestorte galerij. Een tweede sedimentbron voor het centraal-oostelijk deel van de grot is eveneens een instortingsdoline met daglichtverbinding, gelegen vlak ten noorden van de ingang. Een derde instortingsdoline voorziet het noordwestelijk deel van de grot van sediment. Hier is geen daglichtverbinding meer, maar bouwpuin aan de voet van de ingestorte gang toont aan dat deze open verbinding nog recentelijk bestond. Een vierde, kleinere instortingsdoline, vlak ten westen van de in onbruik geraakte verluchtingskoker, voorziet het noorden van de grot van sediment.

Al deze sedimentbronnen komen van recente instortingsdolines, te oordelen naar de steilwanden aan de oppervlakte, met nog actieve intermitterende wateraanvoer. Dit laat vermoeden dat de sedimentaanvoer in het verleden ook uit andere, mogelijk verderop gelegen instortingen kan zijn gekomen[54]. Natuurlijke dolines komen hiervoor



Figuur 95. Topoplan Hinnisdael II met beddingen van modderstromen en overstromingszones, met aanduiding van de verdwijngaten in instortingskuilen en van boringen uitgevoerd doorheen de sedimentopvulling (in blauw: verlaten waterbekkens).

[54] Hinnisdael I en II (Champignonskuil) waren vroeger één grottenstelsel zodat de galerijen zich zeker verder noordwaarts uitstrekten. De zuidgrens is eveneens een grote instortingszone. Volgens lokale bronnen zou er zelfs een ondergrondse verbinding met de Walenkuil bestaan hebben.

nauwelijks in aanmerking: de tongeriaanzanden die hierin worden aangetroffen zijn zo goed als ondoorlatend en belemmeren dus de aanvoer van met leem beladen water. De belangrijkste sedimentbron is vermoedelijk steeds de grote depressie geweest die de zuidelijke ontwikkeling van het gangenstelsel afsnijdt. Minstens drie generaties van instortingen kunnen uit de morfologie van de depressie afgeleid worden. Deze instortingszone capteert daarenboven draineringswater en gebeurlijk ook modderstromen van het leemplateau stroomopwaarts de Mergelkuilen van Hinnisdael (cf. fig. 15).

10.3. Behoud door beheersmaatregelen

Enkele beheerswerken die tot de bevoegdheid van de gemeente behoren, moeten op korte tijd zeker gebeuren. Vooreerst de opruiming van het misselijk makende klein gevaarlijk afval dat in twee grotten (Hinnisdael II en VIII) opgestapeld ligt (Fig. 96). Het verwijderen moet ondergronds manueel gebeuren maar kan uitgevoerd worden door een kleine ploeg op enkele dagen tijd. Verhindering van verder illegaal storten op beide plaatsen is momenteel effectief maar dient wel regelmatig gecontroleerd te worden.
Verder het inactief maken van het verdwijngat van de Vossenkuil, aan de zuidrand van Hinnisdael II of de Champignonskuil. Dit verdwijngat is de voornaamste bron van slib dat in de grot wordt uitgespreid. Het is afkomstig van de hogerop gelegen omgeploegde akkers. Verdere aangroei van de sliblaag is ongewenst omdat dit de vrije circulatie in de grot in het gedrang brengt en bij overstroming tot tegen de zoldering de overwinterende vleermuizenpopulatie in gevaar brengt. Het slib kan daarenboven vervuild zijn door bestrijdingsmiddelen. Het opstroppen van het verdwijngat kan op eenvoudige wijze manueel gebeuren door nabootsing van natuurlijke processen: op een staketsel van takken die te groot zijn om door het verdwijngat afgevoerd te worden, eventueel afgedekt met een laag geotextiel, wordt fijne leem aangebracht en aangestampt, zodat bij een volgende overstroming het water niet zo snel kan wegzijgen en het meegevoerde slib op de bodem van de kuil afzet, alzo bijdragend tot een natuurlijke verdichting. Dit proces kan verstoord worden door verglijdingen van de opvullingslagen of door gravende dieren en de toestand moet dus regelmatig gecontroleerd worden.

Figuur 96. Klein Gevaarlijk Afval en veterinaire preparaten (kleine glazen flesjes), illegaal gestort in de drinkwaterlaag in Hinnisdael VIII (foto J. Frankie).

Andere beheersplannen kunnen enkel gebeuren mits de grondeigenaars ze gedogen maar zijn wel nodig voor het behoud, eventueel herstel van de natuurwaarden en de veiligheid.
Het is vooreerst wenselijk de bezoekersstromen tot de grotten beter te reguleren. Op dit ogenblik staan wel vleermuisvriendelijke Roer-hekken voor de ingangen van Hinnisdael I (zie omslagfoto) en Hinnisdael VII (Waterkuil), maar deze zijn beschadigd en kunnen door de mensen vrij gepasseerd worden, met nadelige gevolgen voor verstoring van het vleermuizenbiotoop, vervuiling van het grondwater en beschadiging van de wanden met verhoogde instortingsrisico's tot gevolg. Herstelling van de afsluiting is daarom geboden, maar dan wel met mogelijkheid tot geleid bezoek, ook voor streekbewoners en toeristen, om de aandrang tot beschadiging van de afsluiting te verminderen. De feitelijke beheerder van het vleermuizenreservaat, Natuurpunt zou hierin het initiatief kunnen nemen.
De toegang tot Hinnisdael III of de Walenkuil kan terug vrijgelegd worden, zoals ook met Hinnisdael II of de Champignonskuil is gebeurd. Op de eerste plaats moet dit dienen om terug een geschikt vleermuizenbiotoop te scheppen, maar het zou ook toelaten het wetenschappelijk onderzoek van de Mergelkuilen te vervolledigen. Voor dit werk zou een kleine graafmachine ingezet kunnen worden, na het uitvoeren van handboringen om de verbinding met de hoofdgalerij te lokaliseren.

Een verder probleem is het instortingsgevaar dat zowel de grondeigenaars als de openbare veiligheid aanbelangt. Er worden gedurig instortingskuilen gevormd, waarvan de grotere zicht geven op de onderliggende galerijen en de kleinere op de bodem nog met leem bedekt blijven maar toch ook metersdiep kunnen zijn. Dergelijke kuilen worden niet alleen gevormd in het bereik van de Mergelkuilen maar kunnen over de gehele zuidelijke helft van de gemeente Vechmaal en de aangrenzende gemeente Horpmaal voorkomen. Standaardpraktijk is dat de kuilen zo snel mogelijk dichtgegooid worden en er geen spoor van overblijft. Risicokartering is dan weinig zinvol. Waarneming van voortekens, zoals scheuren in de grond of waterinfiltratie kunnen helpen om ongevallen te vermijden; de instortingen zelf in open veld worden best niet belet.
Het instortingsgevaar van de toegankelijke grotten kan opgevolgd worden op vergelijkbare wijze als de vleermuizeninventarisatie, met een jaarlijkse inspectie en plaatsin

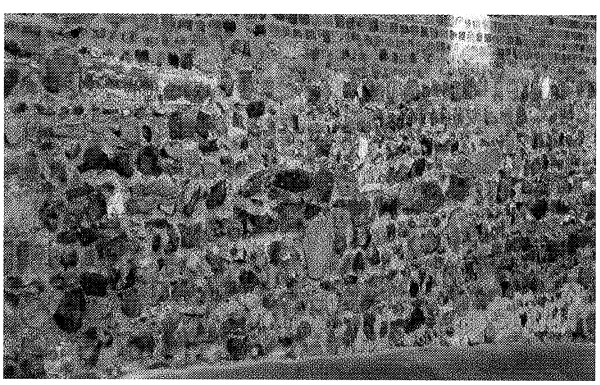
van extensometers over scheuren die het gevolg zijn van de afbouw of kruip, vooral van de publiek toegankelijke delen (bijvoorbeeld in de Waterkuil) of van verzwakte pijlers, gescheurde daken en halfingestorte wanden (Hinnisdael I nabij de ingang) mits uitvoering van de voorzorgsmaatregelen die hieruit worden aangeraden.

11. Bouwstenen

11.1. Voorkomen en winning

Mergelgrotten werden gedolven voor twee doeleinden, als bron voor meststof en als bouwsteen. De alzo geschapen ruimte kon nadien gebruikt worden als woning of stal, of voor de champignonkweek, wat ook in Vechmaal is gebeurd in de eerste helft van de 20ste eeuw.
Verpulverde kalkareniet werd gebruikt om te mergelen, om het kalkverlies van landbouwgrond door verzuring te compenseren en om verslemping tegen te gaan en zo de zware leemgrond beter bewerkbaar te maken. De hoofdreden voor exploitatie was echter het gebruik als bouwsteen. Mergelsteen of Maastrichtersteen werd als grote blokken ondergronds gewonnen en als bouwsteen manueel verzaagd in vaste maten. Belangrijk was wel dat de bouwsteen steeds volgens groefleger werd geplaatst, dus in dezelfde zin als hij ook in de natuur voorkomt en waarin hij de grootste drukkracht kan weerstaan. Grotere blokken silex en tauw werden eveneens gerecupereerd voor de bouw, zij het dat bewerking beperkt bleef tot klieven van de blokken in handzame stukken van ca 15 cm breed.

Het gebruik bepaalde de exploitatievorm van de mergelgrotten en de kwaliteit van de steen bepaalde dan weer het gebruik. Mergelsteen als meststof kan met de pik (houweel) uitgegraven worden en als gruis geleverd. De doorsnede van de gangen was dan boogvormig. De boogvorm komt zeer goed tot uiting in de Waterkuil die niet als bouwsteen werd geëxploiteerd, maar wordt ook teruggevonden in de dieper uitgegraven delen van Hinnisdael I, de Hussenkuil en de nu afgesloten Walenkuil. De bouwsteen werd ondergronds gebroken in rechthoekige blokken van ca 40-50 cm breed, 70-80 cm diep en 0,40-1,80 m hoog. De delen van de grot die als bouwsteen ontgonnen werden zijn te herkennen aan de rechte gezaagde vlakken in de wanden en aan de beitelsporen tussen de blokken of ter hoogte van de bovenkant van de blokken, meestal in hardere fossielgruislagen of silexhorizonten.



Figuur 97. Ondermuur van boerderij gelegen in het centrum van Vechmaal, opgebouwd uit ruwbehouwen ongelijke natuursteen van lokale oorsprong. De voornaamste bijdrage wordt geleverd door silex, aangevuld met tauw en verkiezeld krijt (in grijze tot witte tinten). De verspreid voorkomende grote ronde bleekgrijze stenen zijn tongeriaanse zoetwaterkwartsiet. De grote rechthoekige ingekraste bleek-crême gekleurde stenen met kakibruine verwering zijn Maastrichtersteen (foto M. Dusar).

De exploitatie als bouwsteen bleef beperkt tot een pakket van ca 4 m hoogte in de Kalksteen van Nekum, die ook in de St.-Pietersberg, Kanne en Zichen-Zussen-Bolder het leeuwendeel der grotten bevat. De delving van de grotgangen van Hinnisdael situeert zich dan ook voornamelijk in dit niveau, weliswaar met uitzondering van de Waterkuil die deels in de stratigrafisch jongere en als bouwsteen ongeschikte Kalksteen van Meerssen gedolven is (de goede Kalksteen van Nekum bevindt zich hier dieper en grotendeels onder het grondwaterpeil). De onderkant van de bouwsteenexploitatie werd bepaald door de top van de zone met buisvormige silex. De bovenkant werd bepaald door de Hardground van Caster, de scheiding tussen de Kalksteen van Nekum en de Kalksteen van Meerssen, of bleef op een veiligheidsafstand van minstens 1 m onder de top van het Krijt, al konden dolines wel voor verrassingen zorgen. Gelukkig is de deklaag bestaande uit tongeriaanzand voldoende plakkerig en ondoorlatend om het risico op dakbreuk beperkt te houden.

De tauw is afkomstig uit deels verkiezelde fossielgruislagen of hardgrounds uit de Horizont van Kanne. De bleekgrijze silex komt lokaal voor in een tot 40 cm dikke bijna aaneengesloten laag silexknollen in de diepste exploitaties (Hussenkuil) als in tot 25 cm dikke broodvormige lenzen vlak onder de Horizont van Kanne, deze laatste naast de verkiezelde tauw. Silex werd meer nog dan tauw gebruikt voor funderingen en ondermuren gelijk nu nog te zien is bij oude boerderijen in de streek (Fig. 97). De verdieping van de grotten ging nergens meer dan 70 cm onder dit niveau, wat erop lijkt te wijzen dat deze onderste silexbank nog als een nuttige grondstof werd aangezien (Fig. 41).

11.2. Waar werd de steen van Vechmaal gebruikt?

Het is niet gemakkelijk om op zicht de herkomst van de Maastrichtersteen te bepalen. Het biofacies (de associatie van macrofossielen) is een goed hulpmiddel, maar Vechmaal onderscheidt zich door een gevarieerd en dus atypisch facies met zowel serpula's als zee-egels en oesters. Een voorbeeld van lokaal bouwsteengebruik wordt ongetwijfeld geboden door de Maastrichtersteen

Figuur 98. Maastrichtersteen uit ondermuur toren Kasteel en Slot van Henisdael. Steen met licht afgeschilferd oppervlak en uitgeprepareerde grovere bioklastfragmenten, waarin vooral de oesterschaal opvalt (grootte schaal 4 cm)- (foto M. Dusar).

Figuur 99. Maastrichtersteen uit ondermuur toren Kasteel en Slot van Henisdael. Steen met ingekraste graffiti, vol verspreide kleine echinidenresten, typisch voor de Kalksteen van Nekum (foto M. Dusar).

Borgloon	Borgloon Collegiale St.-Odulfuskerk
Borgloon	Borgloon oud stadhuis
Borgloon	Borgloon stadsomwalling Nellenstraat
Borgloon	Broekom St.-Lambertuskerk
Borgloon	Hoepertingen St.-Vedastuskerk
Heers	Batsheers St.-Stefanuskerk
Heers	Gutshoven St.-Mauruskerk
Heers	Heers St.-Martinuskerk
Heers	Heurne St.-Pieterskapel
Heers	Horpmaal St.-Lambertuskerk
Heers	Veulen O.L.V.-ten-Hemel-Opnemingskerk
Hoeselt	Hoeselt St.-Stefanuskerk
Sint-Truiden	Brustem burchtruïne
Sint-Truiden	St.-Truiden abdijcrypte
Sint-Truiden	Zepperen St.-Genovevakerk
Tongeren	Haren St.-Pieterskerk
Tongeren	Mulken St.-Gilliskapel
Tongeren	Mulken tempelierstoren
Wellen	Berlingen St.-Agathakerk
Wellen	Wellen St.-Jan-de-Doperkerk

Tabel 15. Lijst monumenten met aanwezigheid van tauw, gerangschikt per fusiegemeente (naar Dreesen et al., 2002).

in de onderste geleding van de 16de eeuwse ronde toren van de burcht van Hinnisdael (Kasteel van Henisdael) met de volgende typische kenmerken: vrij platte stenen in lagen van afwisselend 18 en 13 cm hoog, voorkomen van talrijke grote echinidenfragmenten en grote bolle oesters, voorkomen van gelaagde bioklastenslierten vol kleinere echiniden en oesterresten (Figs. 98-99). Serpula's werden hier niet waargenomen. Hun voorkomen in de grotten blijft dan ook grotendeels beperkt tot de zone rond de Horizont van Kanne, al is het aandeel serpula's in vergelijking met echiniden vooral in de Champignonskuil opvallend hoog. Deze zone wordt ook gekenmerkt door het voorkomen van silex en tauw, en fungeerde dus meestal als scheidingsniveau tussen de blokken, een bijkomende reden waarom zo weinig serpula's in de bouwstenen worden aangetroffen.
Behoudens de in reliëf staande gesculpteerde elementen heeft de steen de tand des tijds goed doorstaan. Dit is zeker geen minderwaardige steen, zoals al te snel verondersteld wordt. Blijft dan de vraag waarom de systematische exploitatie gestaakt is. Is men gestoten op stenen van minderwaardige kwaliteit of verkoopwaarde (bijvoorbeeld de roodverkleurde banken uit Hinnisdael I) of was de afzetmarkt te klein? Alle transport moest over land gebeuren, wat de steen voor de gebruiker veel duurder maakte – daarenboven waren er geen grote bevolkingscentra in het natuurlijke hinterland van de steen van Vechmaal.

Een meer betrouwbaar kenmerk voor de regionale uitstraling is de sterke associatie met tauw, dat veelvuldig voorkomt in de top van de geëxploiteerde zone in Vechmaal, maar zeldzaam is in andere ontginningsgebieden van de Maastrichtersteen (Fig. 100). De verbreiding van tauw in Limburgse monumenten is inderdaad veelzeggend (Tabel 15, afgeleid uit Dreesen, Dusar & Doperé, 2002). Met uitzondering van Hoeselt komt tauw vrijwel uitsluitend voor in monumenten gelegen tussen Tongeren en St.-Truiden, met concentratie in de fusiegemeenten Heers en Borgloon. Wij mogen aanemen dat tauw als nevenproduct van de Maastrichtersteen geleverd is. De steen van Vechmaal is dus voornamelijk westwaarts en over land verspreid, wat logisch is want ten oosten van Tongeren lagen de grote productiecentra van Maastrichtersteen zoals Zichen-Zussen-Bolder. In het westen botste de steen op het verspreidingsareaal van de Tufsteen van Lincent, die op gelijkaardige wijze be- en verwerkt werd en waarvan productiecentra ten zuiden van St.-Truiden gelegen waren. De steen van Vechmaal vond dus vooral aftrek in het zuiden van het Graafschap Loon.
Een onzekerheid blijft bestaan met de verdwenen grotten van Horpmaal, die mogelijk ook als productiecentrum van bouwsteen fungeerden. Er is immers veel kans dat hetzelfde facies en rijkdom aan tauw ook op deze plaats zou voorkomen.

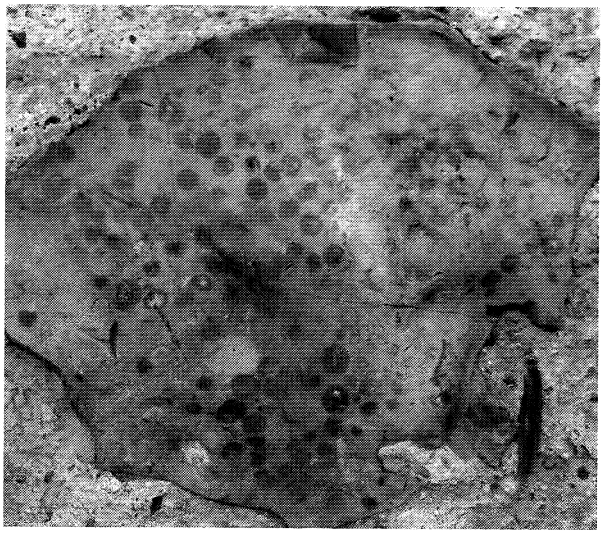
Tauw wordt in historische monumenten steeds geassocieerd met het z.g. Vechmaal facies van vuursteen: een lichtgrijze vuursteen, onregelmatig van vorm, vol donkergrijze centimetergrote vlekken, in feite een doorsnede van ronde kernen (Fig. 101). Deze verkleuring is ondergronds niet waargenomen en zou dus door verwering bevorderd worden. Het lijkt een diagenetisch verschijnsel. Het Vechmaal facies komt voor in fossielarme vuursteen, al wordt vaak een associatie met fossielrijke vuursteen opgemerkt, bij uitstek vertegenwoordigd door kleine zee-egels (*prunella* type) (Fig. 102).

11.3. Wanneer werd de steen van Vechmaal gebruikt?

Bouwstenen waarschijnlijk afkomstig uit Vechmaal, inzonderheid tauw, werden reeds in de 12-13de eeuw gebruikt. Alhoewel het aannemelijk is dat de harde stenen aanvankelijk aan de oppervlakte uitgelezen werden, is ondergrondse mergelwinning vanaf de 13de eeuw mogelijk, naar analogie met de situatie in de St.-Pietersberg. Dit klopt ook met veranderende materiaalkeuze bij nieuwe bouwstijlen. In Romaanse gebouwen is Maastrichtersteen van ondergeschikt belang t.o.v. zandiger steensoorten. Vanaf de vroeggotiek verandert het natuursteengebruik dramatisch: Maastrichtersteen wordt met de bouw van de basiliek van Tongeren in 1240 veruit de dominerende steensoort. De toegenomen vraag naar Maastrichtersteen schept dus vanaf de dertiende eeuw een behoefte aan ondergrondse exploitaties naar de beste bouwsteenlagen in het Maastrichts tufkrijt: mergelgrotten ontstaan uit economische noodzaak (Dreesen, Dusar & Doperé, 2202). Dit wordt bevestigd door lokaal gebruik: de oudst bekende mergelstenen onderdelen van het Kasteel van Vechmaal dateren volgens inscripties van rond 1300. Dat de basiliek van Tongeren gebouwd werd met blokken van Vechmaal is echter een fabel (Dewelf et al., 1978, p. 396). Deze gegevens bevestigen overigens de betrouwbaarheid van de historische bronnen over het bestaan van de mergelkuilen

Het gebruik van tauw is nog algemeen in Romaanse gebouwen maar vermindert drastisch in de tijd. Dit heeft allicht meer te maken met een verminderde appreciatie voor deze moeilijk bewerkbare bouwsteen, maar het geeft toch te kennen dat het hoogtepunt van de exploitaties in de 17de eeuw zeker voorbij was. Nadien zal Vechmaal nog enkel voor lokaal gebruik gefungeerd hebben, of vooral als grondstof voor kalkbemesting. Bij de bouw

Figuur 100. Tauw in ondermuur van boerderij gelegen in het centrum van Vechmaal: grijze verkiezelde kalksteen met ronde secties van serpula of kalkkokerworm (soms overlangs doorsneden) en witte calcietplaatjes van echinidenresten (foto M. Dusar).



Figuur 101. Bleke blauwgrijze, silex vol ronde grofgekristalliseerde kernen van vooralsnog onbekende oorsprong, kenmerkend voor het z.g. Vechmaalfacies in de vuursteentypologie (doormeter <1 cm). Uit ondermuur van boerderij gelegen in het centrum van Vechmaal (foto M. Dusar).

Figuur 102. Bleke blauwgrijze, fossielrijke korrelige silex uit de silexbank onder de Horizont van Kanne, met de kleine zeeegel Hemiaster prunella (doormeter 1-2 cm). Uit ondermuur van boerderij gelegen in het centrum van Vechmaal (foto M. Dusar).

van een nieuwe kerk voor Vechmaal in 1817 werd voor de funderingen mergelsteen gedolven in de kuilen van Hinnisdael te samen met kalk voor de mortel, en dit niet door een ambachtsman maar door een lokale boer, Nijs Toppet, geheel in overeenstemming met de geplogenheden (Dewelf et al., 1978, p. 48).

Bouwsteengebruik lijkt aldus de conclusies van historische studies over de mergelgrotten te bevestigen die de exploitaties in hoofdzaak rond de 15-16de eeuw situeren. Maastrichtersteen is nauwelijks in het landschap rond Vechmaal aanwezig. Vermits er zo weinig is overgebleven hebben de mergelgrotten in de laatste eeuwen nog maar weinig impact op de lokale economie en hebben geen aanleiding gegeven tot toeristische valorisatie zoals in Riemst, Maastricht of Valkenburg des te meer gebeurt[55].

12. Belang en behoud van de mergelgrotten

12.1. Bescherming van de Mergelkuilen van Hinnisdael

Het zuidoosten van Belgisch Limburg (Droog Haspengouw en de Voerstreek), Nederlands Zuid-Limburg, het noorden van de provincie Luik en de omgeving van Aken behoren tot het grensoverschrijdende Mergelland, het hart van de Euregio Maas-Rijn met als centrum Maastricht. Deze streek dankt zijn eigenheid aan de krijtlagen die het landschap modelleren en is de voornaamste leverancier van historische bouwstenen in de beide Limburgen. Met name de mergelgrotten spreken tot de verbeelding en zijn essentieel in de toeristisch-recreatieve beleving. De gemeente Heers, in het bijzonder de kerkdorpen Vechmaal en Horpmaal, deelt de natuurhistorische, cultuurhistorische en esthetische kenmerken van het Mergelland maar voelt er zich in tegenstelling met de gemeente Riemst niet bij betrokken.

Waardering voor het landschap van de Mergelkuilen is er nochtans altijd al geweest. Reeds aan het begin van de twintigste eeuw sprak men van een toeristische trekpleister (zie historisch overzicht). Op het gewestplan St.-Truiden – Tongeren werden de Mergelkuilen als natuurgebied, de Patrijnenkuil en de holle wegen als landschappelijk waardevol agrarisch gebied aangeduid (cf. Bruyninckx & Cuppens, 1964). De Mergelkuilen van Hinnisdael zijn inclusief een deel van de Borgstraat en samen met de Patrijnenkuil beschermd als landschap onder de benaming "GROTTEN VAN HENISDAAL", M&L Objectnummers 000021 – 000289, volgens Beschermingsbesluit 1985-09-30, gepubliceerd in het Belgisch Staatsblad 1986-01-16 (www.monument.vlaanderen.be/engine/ ; gebaseerd op Bats & Van den Eede, 1981). Volgens de biologische waarderingskaart beantwoorden de Eik-Haagbeuk-hellingbossen met kalklievende ondergroei aan de definitie van een "complex van biologische waardevolle en zeer waardevolle elementen"

[55] Maastrichtersteen wordt nog steeds geproduceerd door 'Mergelbouwsteen', Bergstraat 31, NL-6301 AB Sibbe Valkenburg a/d Geul.

terwijl het centrale weiland beantwoordt aan "een complex van biologisch minder waardevolle en zeer waardevolle elementen" (www.geo-vlaanderen.gisvlaanderen.be/geo-vlaanderen/bwk). De Mergelkuilen en het omgevend open akkerlandschap zijn ook erkend als 'ankerplaats' voor het Haspengouwse landschap (cf. www.geo-vlaanderen.gisvlaanderen.be/geo-vlaanderen/landschapsatlas)[56]. De bescherming is feitelijk gebaseerd op de botanische appreciatie van het gebied (Baeyens et al., 1976).

De erkenning van de mergelgrotten van Vechmaal als waardevol ondergronds biotoop op basis van vleermuistellingen en de imminente bedreigingen voor het voortbestaan van dit biotoop door verstoring, beschadiging, afsluiting en vervuiling door pesticiden of door storten hebben ook een rol gespeeld bij de bescherming als landschap (Jooris, 1980). Alle in België voorkomende vleermuissoorten zijn immers bij wet beschermd door het Koninklijk Besluit van 22 september 1980 en de wijzigingen daarop. Dit Koninklijk Besluit werd genomen in uitvoering van de Natuurbehoudswet van 1973 en regelt de bescherming van een aantal inheemse zoogdieren. Alle vleermuissoorten kregen door dit Besluit eveneens een volledige bescherming binnen het Vlaamse Gewest. Concreet betekent dit dat het altijd en overal verboden is de in Vlaanderen voorkomende vleermuissoorten te bejagen of te vangen. De woon- en schuilplaatsen van deze dieren mogen niet worden beschadigd of met opzet worden verstoord.[57] De opvolging van het vleermuizenbestand gebeurt door jaarlijkse wintertellingen door de Vleermuizenwerkgroep van Natuurpunt. De bescherming der vleermuizen en de betiteling van de mergelgrotten als vleermuizenreservaat houdt echter geen wettelijke bescherming van het site in. Strikt genomen hebben de grotten niet het statuut van natuurreservaat, enkel de erin overwinterende vleermuizen zijn beschermd

Dit betekent dat de rol van de eigenaar zeer belangrijk zal zijn bij de instandhouding van de biotopen en hun natuurlijke omgeving. Krachtens de Napoleontische wet op mijnen, groeven en graverijen en de klassering van de mergelgrotten als groeven is de eigenaar van de bovengrond tevens eigenaar van de ondergrond, met alle rechten en verantwoordelijkheid. Enkel bij exploitatie, ook toeristisch is een vergunning vereist, niet in het minst wegens de aanzienlijke veiligheidsrisico's. Vervuiling en beschadiging van het natuurlijke milieu en cultuurhistorisch erfgoed zijn reële problemen die bij verdere discussies over bestemming van de grotten en hun bovengrondse omgeving niet mogen vermeden worden, waar ook de eigendomstitels liggen. In Vechmaal zijn de grotten langs de depressie van de Mergelkuilen gelegen op privé-eigendom terwijl de grotten langs de Borgstraat met de Waterkuil gemeente-eigendom zijn. Deze laatste grot, de enige trouwens die langs een wandelweg gelegen is, kan een 'zachte' toeristische functie krijgen, beperkt tot het didactische domein. De andere grotten blijven voorbehouden voor monitoring en wetenschappelijk onderzoek.

12.2. Geologisch belang

De aardwetenschappelijke en historisch-mijnbouwtechnische waarde van de mergelgrotten van Hinnisdael kan even hoog ingeschat worden als de biologische en is vrij uniek. In de studies die het oorspronkelijke beschermingsbesluit ondersteunden heette dit nog dat de kalkareniet weliswaar fossielrijk was, maar "om technische redenen (gevaar voor instortingen) volledig ongeschikt voor de paleontoloog die macrofossielen daar zou willen verzamelen" (cit. L. Vandepoel in Baeyens et al., p. 23). Dit is wel een erg benepen visie op geologisch onderzoek. De gewestplannen voorzagen dan ook de mergelkuilen als halfopen reservaat, toegankelijk voor het publiek en werd voorgesteld één grot te beveiligen en in te richten als veldmuseum met tentoonstelling van fossielen, in casu de Waterkuil (Cuppens, 1968, p. 63-64). De mergelgrotten van Vechmaal werden opgenomen op een voorlopige lijst van belangwekkende geosites voor geoconservatie in Belgische Limburg (Dreesen et al., 2001).

Geoconservatie houdt zich bezig met "het behoud van landschapsvormen, van natuurlijke en kunstmatige ontsluitingen van gesteenten, met de studie van actieve geologische en geomorfologische processen, met de vulgarisatie naar het geïnteresseerde publiek toe en met de opvoeding van de nieuwe generaties" (Jacobs, 1995).

---

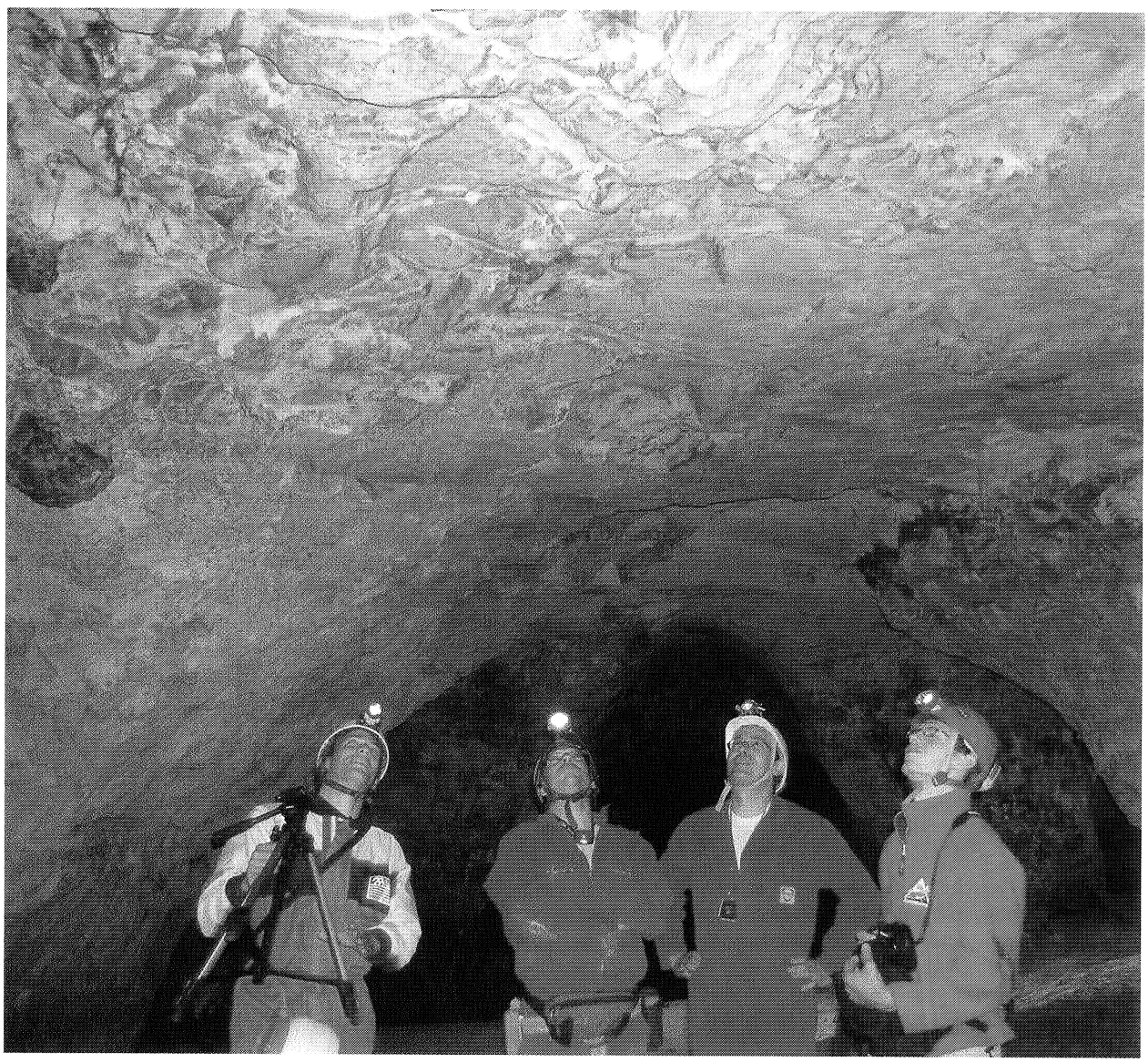
[56] Ankerplaats: "een gebied dat behoort tot de meest waardevolle landschappelijke plaatsen, dat een complex van gevarieerde erfgoedelementen is die een geheel of ensemble vormen, dat ideaal-typische kenmerken vertoont vanwege de gaafheid of representativiteit, of ruimtelijk een plaats inneemt die belangrijk is voor de zorg of het herstel van de landschappelijke omgeving" (Decreet van 16 april 1996 betreffende de landschapszorg, gewijzigd bij decreet van 18 mei 1999, 8 december 2000, 21 december 2001 en 19 juli 2002 en 13 februari 2004).
Beschermd landschap: "een landschap van algemeen belang wegens zijn natuurwetenschappelijke, historische, esthetische of sociaal-culturele waarde, definitief beschermd volgens de hoofdstukken II en III van dit decreet" <www.monument.vlaanderen.be/aml/nl/wetten/wet_2004.htm>.

[57] Ook door de Habitatrichtlijn worden alle vleermuissoorten strikt beschermd (naar D. Verbelen: Wielewaal/DOCUMENTEN/Vleermuizen).

Figuur 103. Hinnisdael VII (Waterkuil) algemeen beeld met netwerk van boogvormige gangen in de doorgaans droge daglichtzone (foto M. Dusar).

Een geosite is een plek waar aan geoconservatie wordt gedaan, maar die op dynamische wijze beheerd moet worden. Geosites worden immers ook gekenmerkt door specifieke biologische habitats die enkel daar thuishoren. In dit kader wordt gewerkt aan duurzame ontwikkeling, landschaps- en sitebescherming, gesteund door plaatselijke initiatieven, publieke belangstelling en Europese netwerken (Dreesen et al., 2001).

De mergelgrotten van Vechmaal vertonen talrijke geologische verschijnselen en de sporen van eeuwenlang menselijk gebruik zijn duidelijk. Van alle mergelgrotten is de Waterkuil echter de enige die door ligging, veiligheid en eigendomstitels in aanmerking komt voor milieu-educatie en recreatieve beleving. Dit is zeker in overeenstemming met de langetermijnvisie van de gemeente Heers. In het enigszins beklemmende kader van halfondergelopen



Figuur 104. Tweede hardground in de Kalksteen van Meerssen met 'mijnwerkerskreeften', Hinnisdael VII (Waterkuil) - (foto L. Willems).

gangen met sporen van instortingen zijn zelfs bij het gedempte daglicht nog heel wat geologische waarnemingen te doen (Fig. 103). Zo zijn in de Waterkuil twee leden van de Kalksteen van Maastricht ontsloten, de Kalkstenen van Nekum en van Meerssen, met spectaculaire ontsluitingen van het grensvlak, gevormd door de Hardground van Caster (Fig. 104). De kalksteen is erg fossielrijk, vooral goed waarneembaar in het dak van de gangen (Fig. 50). Dwars door de grot en vooral goed waarneembaar in de eerste vrijstaande pilaar links van de hoofdgang gaat een tektonische breuk met verplaatsing door de Hardground van Caster (Fig. 65). Tussen de hardgrounds die elkaar in de basislagen van de Kalksteen van Meerssen opvolgen, in het dak van de zuidelijke ingangspartij, zijn anastomosen waarneembaar, kanaalachtige karstoplossing en het begin van natuurlijke grotvorming (Fig. 80). Elders zijn de sporen van pik of houweel goed waarneembaar in de grotgangen, maar langs de buitenwand komen rechtgezaagde wanden voor. Voor mooie voorbeelden van het blokbreken moet men in de andere grotten van Hinnisdael zijn, of kan men ook in Kanne of Zichen-Zussen-Bolder terecht. Dat de wanden niet geheel stabiel zijn kan aangetoond worden door platen die van het dak naar beneden zijn gekomen. Het effect van kleinmenselijk gedrag op natuur en landschap wordt duidelijk gemaakt door de visuele vervuiling in de vorm van graffitti en beschadigingen van de oude wanden en in de afval die wordt achtergelaten. Het effect van een vochtig en gelijkmatig microklimaat wordt aan den lijve ondervonden. Het contact met het grondwater en de noodzaak tot bescherming ervan is evident, de schommelingen van de grondwatertafel zijn duidelijk op de wanden af te lezen (Fig. 81), de mineralisatie en de verworven hardheid worden aangetoond door de drijvende calcietkristallen (Fig. 86).

De Waterkuil beschikt dus over meerdere unieke geologische waarden om als geologisch monument erkend te worden. Kleinschalige toeristische ontwikkeling van dit unieke geosite kan ingekaderd worden in bestaande lokale en Haspengouwse initiatieven. Hoe het kan verlopen wordt geïllustreerd door het geologische monumenten circuit in het Mergelland van Nederlands Zuid-Limburg (Bosch, 1999).

13. Besluit

De mergelgrotten van Vechmaal vormen het meest westelijke, nog goed bewaarde ondergrondse groevestelsel ter exploitatie van de Maastrichtersteen in het Limburgse Mergelland. De mergelgrotten zijn eeuwenoud, vermoedelijk ontstaan in de dertiende eeuw, en getuigen van verschillende exploitatiemethoden afhankelijk van het gebruik als bouwsteen of mergel en aangepast aan geotechnische beperkingen. De productie is uitgedoofd tijdens de 19de eeuw. Acht verschillende grotten, Hinnisdael I tot VIII zijn gerepertorieerd, waarvan zes nog toegankelijk in kaart zijn gebracht met een totale oppervlakte van minder dan 3 ha. De exploitatie volgens de blokbrekerstechniek was zeker efficiënt met een afbouwratio van 80%. Bouwsteen, de Maastrichtersteen, was het voornaamste product en vond aftrek in het Land van Loon, samen met nevenproducten zoals silex en tauw.

De jongste leden van de Formatie van Maastricht zijn ontsloten door de ondergrondse exploitaties, de Kalkstenen van Nekum en Meerssen, met facies en diktevariaties goed vergelijkbaar met het typegebied ten zuiden van Maastricht. De Kalksteen van Nekum bestaat uit fijne kalkarenieten met fossielgruislagen, met ondergeschikt silex en tauw; de Kalksteen van Meerssen bestaat uit een afwisseling van fijne tot grove kalkareniet met hardgrounds. Bouwsteenwinning was beperkt tot het midden- en bovendeel van de Kalksteen van Nekum tussen de onderste vuursteenzone en de Hardground van Caster aan de top. Ook de fossielrijke Horizont van Kanne vormt een gidslaag.

De Krijtlagen hellen af in noordoostelijke richting met een helling minder of gelijk aan 1°, doch versterkt door breuktrappen. Deze helling staat haaks op de regionale afhelling naar het NNW maar vormt samen met het diaklaaspatroon een aanduiding voor reactivatie van het onderliggende Caledonisch fracturatiepatroon in relatie met de oostelijke breukbegrenzing van het Massief van Brabant. De Formatie van Maastricht wordt overdekt door de Formatie van St.-Huibrechts-Hern, waarneembaar boven de grotingangen en in oplossingsdolines of dakbreuken. Soms is hierin een residuele, niet karteerbare breksie van Gelinden Mergel aanwezig. Vroegtijdige karstwerking heeft de kalksteen aangetast, niet alleen in de vorm van oplossingsdolines en geologische orgelpijpen, gevuld met jongere sedimenten, maar ook als door oplossing verwijde spleten, alveolen en freatische tunnels. Vooral de Hardground van Caster is verkarst. De hypothese wordt geformuleerd dat de soms bijzonder hoge productiviteit van de Maastrichtiaanse aquifer niet zozeer ontstaat door secundaire spleetporositeit maar wel door open karst. De hoge grondwaterstand was een limiterende factor voor de groeve-uitbating. Fluctuaties in de grondwaterspiegel volgen de meerjarige trend van het neerslagregime.

Veel grotgangen eindigen op instortingen, het resultaat van dakbreuken, of opvullingen, het resultaat van uitvloeiing vanuit natuurlijke oplossingsdolines. Meer recente instortingstrechters lopen soms door tot aan de oppervlakte en de vorming hiervan is niet afgelopen. Zij tonen soms vensters op afgelegen grottenstelsels maar zijn ook verantwoordelijk voor de scheiding tussen de grootste grotten Hinnisdael I en II in de tweede helft van de 20ste eeuw. De grot Hinnisdael I vertoont kort bij de ingang een risicozone voor verdere instorting. De grot Hinnisdael II is grotendeels dichtgeslibd door modderstromen aangevoerd langs verdwijngaten in oppervlakkige

instortingsdolines. Deze moeten inactief gemaakt worden om de grot te behouden.

De Mergelkuilen van Hinnisdael zijn beschermd als landschap en als vleermuizenbiotoop. Kleinere beheerswerken zijn nodig om de waarde van dit site te bewaren. De Waterkuil (Hinnisdael VII) leent zich evenwel tot erkenning en uitbouw als geosite.

14. Referenties

ANCIAUX, F., 1950. Cavernes. Editions Guide de la Nature. Bellevue, Dinant. 315 p.

BATS, H. & VAN DEN EEDE, C., 1981. De Mergelkuilen en de Patrijzenkuil te Heers (Vechmaal). RMLZ-Documentatiemap Landschapsonderzoek nr. 3 (december 1981): 58-62.

BAEYENS, L.; BERTEN, R.; GABRIELS, J. & NEF, L., 1976. Natuurwetenschappelijke evaluatie van de Mergelkuilen en de Patrijzenkuil te Vechmaal (gemeente Heks). LISEC, 30 p.

BEKENDAM, R.F., 1998. Pillar stability and large scale collapse of abandoned room and pillar limestone mines in south-Limburg, The Netherlands. Ph. D. TU Delft. ISBN 90-9011726-1, 360 p.

BLESS, M.J.M.; BOUCKAERT, J. & PAPROTH, E., 1981. Vise-Puth: stimulant for further exploration? *Annales de la Société géologique de Belgique*, 104: 291.

BLESS, M.J.M.; DUSAR, M.; FELDER, P.J. & SWENNEN, R., 1993. Lithology and biostratigraphy of the Upper Cretaceous - Paleocene carbonates in the Molenbeersel borehole (NE Belgium). *Geologie en Mijnbouw*, 71: 239-257.

BLESS, M.J.M. & FERNANDEZ NARVAIZA, M.C., 1993. Onder de Euregio – De verbinding tussen landschap en geologie in de Euregio Maas-Rijn. *Toelichtende verhandelingen voor de Geologische en Mijnkaarten van België (Memoirs of the Geological Survey of Belgium)*, 34, 181 p.

BLESS, M.J.M. & FERNANDEZ NARVAIZA, M.C., 1994. Met loep en lepel rond Aachen, Gulpen en Maastricht. Op zoek naar het Krijt in de Euregio Maas-Rijn. Afdeling Limburg der Nederlandse Geologische Vereniging, 240 p.

BOSCH, P.W.,1999. Geologische Monumenten in Zuid-Limburg. Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, CD-ROM NITG 9901.

BOYEN, Y., 1989. Folx-les-Caves et ses souterrains fabuleux. Brabant Tourisme, Juin 1989 : 3-29.

BREULS, T., 1984. De instortingen van de Muizenberg te Kanne. Natuurhistorisch Genootschap in Limburg, Studiegroep Ondergrondse Kalksteengroeven, *SOK Mededelingen* nr. 5: 30-38.

BREULS, T., 1985. Blokbreken in Kanne, een korte beschrijving van enkele technieken. Natuurhistorisch Genootschap in Limburg, Studiegroep Ondergrondse Kalksteengroeven, *SOK Mededelingen* nr. 7: 13-18.

BREULS, T., 1994. Mergelgrotten, het onbekende landschap van Limburg. Uitg. Mergelbouwsteen, Sibbe. ISBN 90-801848-1-0. 54 p.

BROOS, Ph., 1998. Pilaren, kruip en instortingen in kalksteengroeven. *Delft Integraal* 98.4: 16-21.

BRUYNINCKX, H. & CUPPENS, H., 1964. Inventaris van de Landschappen – Tome V – Provincie Limburg. Bestuur van Stedebouw en Ruimtelijke Ordening – Nationale Survey.

CALEMBERT, L., 1947. Phosphates de la Hesbaye. Centenaire de l'Association des Ingénieurs sortis de l'Ecole de Liège, Congrès 1947. Section Géologie: 341-344.

CLAES, S. & GULLENTOPS, F., 2001. Kaartblad 33 Sint-Truiden, 1:50.000. *Toelichtingen bij de geologische kaart van België – Vlaams Gewest*. Belgische Geologische Dienst en Afdeling Natuurlijke Rijkdommen en Energie, Brussel. 67 p.

CLAES, S.; FREDERICKX, E.; GULLENTOPS, F. & FELDER, W., 2001. Kaartblad 34 Tongeren, 1:50.000. *Toelichtingen bij de geologische kaart van België – Vlaams Gewest*. Belgische Geologische Dienst en Afdeling Natuurlijke Rijkdommen en Energie, Brussel. 55 p.

CUPPENS, H., 1968. Bescherming en toeristische valorisatie van het Limburgs natuurpatrimonium. Provinciale Commissie voor Natuurparken en toeristische receatieoorden.

DAHLEN, J. ('Vleermuizenwerkgroep'), 1991. De Mergel"grotten" van Vechmaal. Natuurreservaten, 43 p. (tentoonstellingsbrochure).

DAHLEN, J., 1992. 50 jaar vleermuiswaarnemingen in de mergelgroeven van Vechmaal (Heers). *LIKONA Jaarboek* 1991: 8.1-8.8.

DEFOUR, E.; GEUSSENS, T.; INDEHERBERGE, L. & STRIJBOS, V., 1994. Vormvariaties van *Hemipneustes striatoradiatus* en *Hemiaster prunella* uit het Boven-Krijt van Limburg. *LIKONA Jaarboek* 1993: 7-14.

DE SMEDT, P.; DRIESSEN, L. & VANBAELEN, J., 1981. Hydrogeologische aspecten van de secundaire en vroeg tertiaire formaties in Zuid-Limburg. *Hydrographica*, 2-1981.

DEWELF, A.; WIJNEN, C.; KELKENEERS, J. & DULLAERS, L., 1978. Het dorpsverleden van Vechmaal. BGJG-Vechmaal, 443 p.

DHONDT, A.V., 1998. Bivalven. In: Jagt et al., eds. Fossielen van de St. Pietersberg. *Grondboor & Hamer*, 52: 110-113.

DIDDEN, J.M., 1996. Tektoniek, karst en speleothemen in de kalksteen van het Laat-Maastrichtien van Zuid-Limburg. *Natuurhistorisch Maandblad* 85: 72-82.

DIRIKEN, P., 1985. Water in Haspengouw. *Blauwe Vogel Geo-Gids*, 105 p.

DREESEN, R.; DUSAR, M. & BEERTEN, K., 2001. De onderkant van Limburg, verwaarloosd erfgoed. *LIKONA Jaarboek* 2000: 19-31.

DREESEN, R.; DUSAR, M. & DOPERÉ, F., 2002. Atlas natuursteen in Limburgse monumenten. Provincie Limburg. 294 p.

DUBELAAR, C.W.; DUSAR, M.; DREESEN, R.; FELDER, W.M. & NIJLAND, T.G., 2006. Maastricht Limestone (Upper Cretaceous): a regionally significant building stone in Belgium and The Netherlands. Extremely weak, yet time-resistant. Proceedings Heritage, Weathering and Conservation Conference - HWC-2006, Madrid, 21-24 June 2006, 6 p. (in press).

DUCHATEAU, G., 1959. Toponymie van Vechmaal. Rijksuniversiteit Gent, Licenciaatsverhandeling, 183 p.

DULLAERS, L., 1982. Dorpskalender Heers 1982. BGJG-Vechmaal.

DULLAERS, L., 2004. Dorpskalender Heers 2004. Gezinsbond-Vechmaal.

DUNHAM, J.D., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Classification of carbonate rocks, W. Ham (ed.). *American Association of Petroleum Geologists Memoir* 1: 108-121.

DUSAR, M., 1969. Mergelgrotten van Vechmaal en afvaart Jeker. *SPE-LONK, Informatieblad van de Speleoklub van de Katholieke Universiteit Leuven*, 1968-69, nr 3: 7-8.

DUSAR, M. & DREESEN, R., 2001. Excursie. In: Claes, S. & Gullentops, F. Kaartblad 33 Sint-Truiden, 1:50.000. *Toelichtingen bij de geologische kaart van België – Vlaams Gewest.* Belgische Geologische Dienst en Afdeling Natuurlijke Rijkdommen en Energie, Brussel. 67 p.: 44-59.

DUSAR, M.; DREESEN, R. & DE NAEYER, A., 2003. Technische fiches van natuursteen gebruikt in België (Maastrichtersteen, Potamides-kwartsiet, Romeinse zandsteen, Vuursteen (silex). *Kluwer Documenta. Handboek Onderhoud, Renovatie, Restauratie.* Aflevering 16, Augustus 2003. II.3. Bouwmaterialen. Natuursteen: 181-212.

DUSAR, M.; DREESEN, R. & DE NAEYER, A., 2004. Technische fiches van natuursteen gebruikt in België (Tauw, Tienen-kwartsiet, Vulkanische tufsteen, Zoetwaterkwartsiet). *Kluwer Documenta. Handboek Onderhoud, Renovatie, Restauratie.* Aflevering 18, Februari 2004. II.3. Bouwmaterialen. Natuursteen: 39-67.

DUSAR, M. & DREESEN, R., 2005. Meuse-Rhine Euregio Geologists Meeting Alden Biesen (BE) 20-21.5.2005. Abstracts and Programme, 49 p.

DUSAR, M. & HAMMENECKER, J., 1993. Instortingsholten op de Keizersberg te Leuven. *Bulletin van de Belgische Vereniging voor Geologie*, 101: 311-314.

DUSAR, M. & LAGROU, D., 2000. Een grot in Vlaanderen. Instortingsholte te Hoegaarden-Hoksem. *Spelerpes*, nr 90: 37-38.

DUSAR, M. & LANGENAEKER, V., 1992. De oostrand van het Massief van Brabant, met beschrijving van de geologische verkenningsboring te Martenslinde. *Belgian Geological Survey, Professional Paper* 1992/5 - N°255, 22 p.

FELDER, P.J., 1981. Mesofossielen in de kalkafzettingen uit het Krijt van Limburg. *Publicaties van het Natuurhistorisch Genootschap in Limburg*, 31, 2.

FELDER, P.J., 2001. Bioklasten-stratigrafie of ecozonatie voor het Krijt (Santoniaan – Campaniaan - Maastrichtiaan) van Zuid-Limburg en oostelijk België. *Memoirs of the Geological Survey of Belgium*, 47, 141 p.

FELDER, P.J.; BLESS, M.J.M.; DEMYTTENAERE, R.; DUSAR, M.; MEESSEN, J.P.M.TH. & ROBASZYNSKI, F., 1985 - Upper Cretaceous to Early Tertiary deposits (Santonian - Paleocene) in northeastern Belgium and South Limburg (The Netherlands) with reference to the Campanian - Maastrichtian. *Belgian Geological Survey, Professional Paper* 1985-2: 151 p.

FELDER, W.M., 1975. Lithostratigrafie van het Boven-Krijt en het Dano-Montien in Zuid-Limburg en het aangrenzende gebied. In: Zagwijn, W.H. & van Staalduinen, C.J. (eds). Toelichting bij geologische overzichtskaarten van Nederland. Haarlem (Rijks Geologische Dienst): 63-72.

FELDER, W.M. & BOSCH, P.W., 1998a. De St. Pietersberg: typelokatie van het Maastrichtien. *Grondboor & Hamer*, 52: 51-52.

FELDER, W.M. & BOSCH, P.W., 1998b. Geologie van de St. Pietersberg bij Maastricht. *Grondboor & Hamer*, 52: 53-63.

FELDER, W.M. & BOSCH, P.W., 2000. Krijt van Zuid-Limburg. *Geologie van Nederland*, deel 5. NITG, 90-6743-710-7. 192 p.

FOLK, R.L., 1966. A review of grain-size parameters. *Sedimentology*, 6: 73-93.

FORD, D.C. & WILLIAMS, P.W., 1989. Karst Geomorphology and Hydrology. *Unwin Hyman*, 601 p.

FORD, T.D. & CULLINGFORD, C.H.D., 1963. The science of speleology. *Academic Press*, 593 p.

GROESSENS, E., 1998. Les carrières souterraines de Folx-les-Caves (Belgique). *Bulletin de la Commission royale des Monuments, Sites et Fouilles*, 16.1 : 14-37.

GULINCK, M., 1974. Hydrogeologische verkenningen in Limburg. Boringen te Alken – Velm – Lauw – Vechmaal – Genoelselderen – Millen – Riemst. *Belgian Geological Survey, Professional Paper* 1974/1 N. 102, 35 p.

GYSELINCK, J., 1989. Mergel als bouwsteen. *Monumenten en Landschappen*, 8/4: 26-31.

INDEHERBERGE, L.; BOGAERTS, D.; GEUSSENS, T. & SNELLINGS, J., 1996. Tussen Vechmaal en Kanne: een geologische tocht door het Krijt van Zuidoost-Limburg. *LIKONA Jaarboek* 1995: 7-15.

JACOBS, P., 1995. Geoconservatie. *Monumenten & Landschappen*, 14/2: 45-55.

JAGT, J.W.M.; LELOUX, J. & DHONDT, A.V., eds., 1998. Fossielen van de St. Pietersberg. *Grondboor & Hamer*, 52: 93-156.

JONGEN, P., 1988. Mergel, bouwsteen van de streekgebonden architectuur. Eindwerk P.H.A.I. Diepenbeek, 100 p.

JOORIS, R., 1980. Korte nota over de chiropterologische waarde van de "Mergelkuilen" te Vechmaal en het behoud ervan als vleermuizenreservaat. Belgische Natuur- en Vogelreservaten. Intern rapport, 3 p.

KLEYNEN, A. & HILLEGERS, H., 1976. Blokbreken, een Zuid-Limburgs ambacht. *Natuurhistorisch Maandblad*, 65: 12-17, 33-36, 42-49.

LAGA, P.; LOUWYE, S. & GEETS, S., 2001. Paleogene and Neogene lithostratigraphic units (Belgium). In Bultynck & Dejonghe; eds., Guide to a revised lithostratigraphic scale of Belgium. *Geologica Belgica*, 4/1-2: 135-152.

LECLERCQ, F. & BOUKO, Ph., 1985. La Malogne. *Faculté Polytechnique Mons*, 63 p.

LEGRAND, R., 1968. Le Massif du Brabant. *Mémoires Explicatives de Cartes géologiques et minières de Belgique* (*Memoirs of the Geological Survey of Belgium*), 9: 148 p.

LELOUX, J., 1998. Foraminiferen. In: Jagt et al., eds. Fossielen van de St. Pietersberg. *Grondboor & Hamer*, 52: 102-103.

LOË, A. de, 1902. Examen et étude des grottes de Hinnisdael. *Annales de la Société Archéologique de Bruxelles*, 16: 14-15.

MACAR, P., 1947. Tuffeau de Maestricht. Centenaire de l'Association des Ingénieurs sortis de l'Ecole de Liège (A.I.Lg.). Congrès 1947, Section Géologie: 337-341.

MEGNIEN, Cl., 1964. Observations hydrogéologiques sur le sud-est du bassin de Paris. Les circulations aquifères dans le Jurassique et le Crétacé de Lyonne. Thèse de 3e cycle soutenue le 28 mars 1960, Fac. des Sciences, Univ. Paris. *Mémoires du BRGM*, 25, 288 p.

OLEFS, P.; WILLEMS, J. & DAHLEN, J., 1991. Vleermuistellingen van de winter 1990-1991 in Belgisch Limburg en het aangrenzende Bassenge (Luik). Natuurhistorisch Genootschap in Limburg, Studiegroep Ondergrondse Kalksteengroeven, *SOK Mededelingen* nr. 17: 3-8.

OLEFS, P.; WILLEMS, J. & DAHLEN, J., 1992. Vleermuistellingen winter 1991-1992 in Belgisch Limburg en het aangrenzende Bassenge (Luik). Natuurhistorisch Genootschap in Limburg, Studiegroep Ondergrondse Kalksteengroeven, *SOK Medelingen* nr. 19: 17-22.

ORBONS, J., 2005. Inventarisatie van de ingangen van onderaardse kalksteengroeven in Nederland 2002-2004, Natuurhistorisch Genootschap in Limburg, Studiegroep Ondergrondse Kalksteengroeven, *SOK Mededelingen*, januari 2005.

PRICE, D.G., 1992. De instorting van de Heidegroeve: anamnese van verzakking boven verlaten mijnbouwkundige werken in kalksteenafzettingen. Natuurhistorisch Genootschap in Limburg, Studiegroep Ondergrondse Kalksteengroeven, *SOK Mededelingen* nr. 18: 29-38.

RADEMAKERS, P.C.M., 1998. Geologie van de St. Pietersberg. Geologische orgelpijpen. *Grondboor & Hamer*, 52: 71-76.

RODET, J., 1991. La craie et ses karsts. Centre normand d'étude du karst et des cavités du sous-sol & Groupe Seine, 560 p.

ROER, H., 1971. Weitere Ergebnisse und Aufgaben der Fledermausberingung in Europa. *Decheniana Beihefte* 18: 121-144.

ROSSA, H.G., 1986. Upper Cretaceous and Tertiary inversion tectonics in the western part of the Rhenish-Westphalian coal district (F.R.G.) and in the Campine area (N. Belgium). *Annales de la Société géologique de Belgique*, 109: 367-410.

ROUX, J.CL., 1978. Rapport général du thème I : réservoir et ressources. Coll. Régional « Hydrogéologie de la craie du basin de Paris », Rouen, 25-26 mai 1978, AGBP &BRGM. Documents du BRGM 1979-3: 11-40 (in Rodet, 1991).

SILVERTANT, J., 2003. De ontstaansgeschiedenis van de gangenstelsels te Klein-Ternaaien (België). *Natuurhistorisch Maandblad*, 92: 334-340.

SMITSHUYSEN, E., 1983. Karst in Limburg. Natuurhistorisch Genootschap in Limburg, Studiegroep Ondergrondse Kalksteengroeven, *SOK Mededelingen* nr. 2: 13-16.

STEVENHAGEN GEO INFORMATICA, 2003. De Limburgse Mergelgroeven. http://web.inter.nl.net/hcc/Ed.Stevenhagen/groeven/index.html.

SWENNEN, R. & DUSAR, M., 1997. Diagenesis of Late Cretaceous to Paleocene carbonates in the Rur Valley Graben (Molenbeersel borehole, NE-Belgium). *Annales de la Société Géologique du Nord*, t. 5 (2ème série): 215-226.

SWERTS, J., 1986. Tektonische invloeden op de morfologie van het Jekerdal. R.U. Gent, Labo Fysische Geografie, Licenciaatsverhandeling, 124 p.

VAN DEN BROECK, E. & RUTOT, A., 1902. Carte géologique de la Belgique, Heers-Looz N° 106. Commission géologique de Belgique.

VANDER MAELEN, Ph., 1835. Dictionnaire géographique du Limbourg. Etablissement géographique, Bruxelles, 149 p. [facsimile uitgave in de reeks *Maaslandse Monografieën*, Van Gorcum Assen, 1978].

VANDYCKE, S. & BERGERAT, F., 1989. Analyse microtectonique des déformations cassantes dans le bassin de Mons. Reconstruction des paléo-champs de contrainte au Crétacé – Tertiaire. *Annales de la Société géologique de Belgique*, 112: 469-478.

VAN KNIPPENBERG, P.H.M., 1998. Gastropoden. In: Jagt et al., eds. Fossielen van de St. Pietersberg. *Grondboor & Hamer*, 52: 108-109.

VAN SCHAIK, J. & STARMANS, C., 1985. Het water in de Gemeentegrot (deel 1). Natuurhistorisch Genootschap in Limburg, Studiegroep Ondergrondse Kalksteengroeven, *SOK Mededelingen* nr.8: 18-21.

VAN SCHAIK, W.C.L., 1997. Enige opmerkingen betreffende "gesteentedruk" in mergelgangen. Natuurhistorisch Genootschap in Limburg, Studiegroep Ondergrondse Kalksteengroeven, *SOK Mededelingen* nr. 27: 38-46.

VAN WIJNGAARDEN, A., 1967. Ons Krijtland Zuid-Limburg III. De ondergrondse kalkgroeven van Zuid-Limburg. *Wetenschappelijke Mededelingen van de Koninklijke Nederlandse Natuurhistorische Vereniging* no. 71, 28 p.

VONHOF, H.B. & SMIT, J., 1996. Strontium isotope stratigraphy of the type Maastrichtian and the Cretaceous/Tertiary boundary in the Maastricht area (SE Netherlands). *Geologie & Mijnbouw*, 75: 275-282.
WALSCHOT, L., 2002. Mergel gebroken, een inventarisatie van ondergrondse kalksteengroeven in Nederland. ISBN 90-90154 14-0. 352 p.
WILLEMS, L.; RODET, J.; FOURNIER, M.; MASSEI, N.; LAIGNEL, B.; DUSSART-BAPTISTA, L.; SCHYNS, J.-C.; DUSAR, M. & EK, C., 2005. Genèse d'un système karstique dans la craie en Basse Meuse (Frontière belgo-néerlandaise). Colloque «Karst et aménagement du territoire» MRW - Direction générale de l'Aménagement du Territoire, du Logement et du Patrimoine du Ministère de la Région wallonne, Jambes, 25-27.5.2005.
WILLEMS, L., RODET, J., FOURNIER, M., MASSEI, N., LAIGNEL, B., DUSSART-BAPTISTA, L., SCHYNS, J.C., DUSAR, M., LAGROU, D., EK, C., 2005. Genesis of a karst system in the Lower Meuse chalk district (Belgian-Dutch border). Actes Colloque UIS, Athens, 6 p. – in druk.
ZIJLSTRA, J.J.P., 1994. Sedimentology of the Late Cretaceous and Early Tertiary (tuffaceous) chalk of northwest Europe. *Geologica Ultraiectina*, 119, 192 p.

Manuscript ontvangen 28.10.2005 en aanvaard voor publicatie 24.11.2005.

ISSN 0378-0902

© Geological Survey of Belgium

Guide for authors: see website Geologica Belgica
http://www.ulg.ac.be/geolsed/GB
List of publication and sale: see website Geological Survey of Belgium
http://www.naturalsciences.be/geology/homepage/
or website Royal Belgian Institute of Natural Sciences
http://www.natuurwetenschappen.be/common/pdf/science/publications/Cata/index.html

---

Editeur responsable: Camille PISANI
Institut royal des Sciences
naturelles de Belgique
29, rue Vautier
B-1000 Bruxelles

Verantwoordelijke uitgever: Camille PISANI
Koninklijk Belgisch
Instituut voor
Natuurwetenschappen
Vautierstraat 29
B-1000 Brussel

Impression: Service public fédéral Economie, P.M.E.,
Classes moyennes et Energie

Drukwerk: Federale Overheidsdienst Economie,
K.M.O., Middenstand en Energie

* "The Geological Survey of Belgium cannot be held responsible for the accuracy of the contents, the opinions given and the statements made in the articles published in this series, the responsability resting with the authors".

0954-05