
Kalk en kwel

Calciumrijke kwel en de verbreiding en genese van kalkrijke sedimenten in de Centrale Slenk

R.B.J. Hemel
R.J. Stuurman

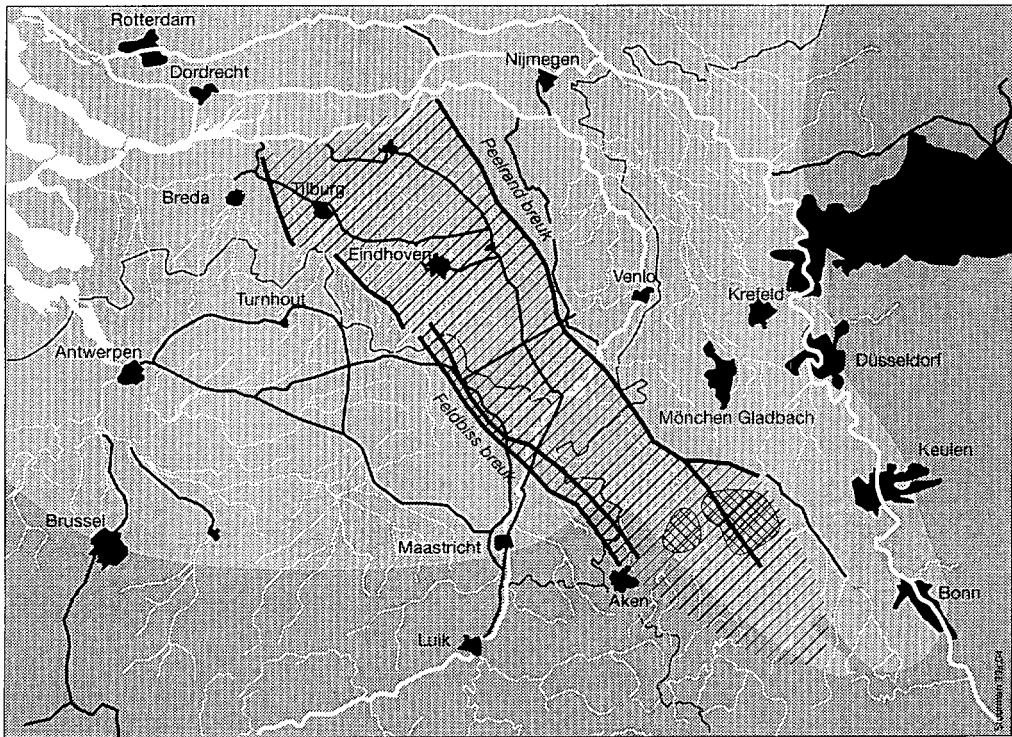
Aanleiding

In Nederland worden natuurwaarden in grondwaterafhankelijke ecosystemen op veel plaatsen aangetast door hydrologische veranderingen. Met name de hoge zandgronden in het oosten en het zuiden lijken kwetsbaar (Runhaar e.a., 1996; Projectteam Verdroging, 1989). Hydrologisch onderzoek in deze gebieden laat een gemiddelde daling van het freatisch grondwaterpeil zien van enkele decimeters sinds 1950 (Rolf, 1989; Van Amstel e.a., 1989). In de provincie Noord-Brabant worden meer dan 250 natuurbeheersgebieden beïnvloed door watertekort (Verstegen, 1993; Verstegen, 1994). In het kader van een door het ministerie van LNV gesubsidieerd doelsubsidieonderzoeksproject wordt door het Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO onderzoek uitgevoerd naar de hydrogeochemische processen tijdens herstel van grondwaterafhankelijke ecosystemen (het zgn. SYSNAT-project).

Eén van de onderzoeksgebieden is de Centrale Slenk (in Limburg Roerdal-Slenk genoemd) in het zuiden van Nederland. De Centrale Slenk is gelegen in oostelijk Noord-Brabant en in het noorden van de provincie Limburg en loopt door tot in Duitsland (figuur 1). De Centrale Slenk wordt gekarakteriseerd door diepe grondwaterstroming. Het grondwater stroomt voornamelijk in een noordwestelijke richting (Stuurman e.a., 1990). Dit wordt ook bevestigd door de opeenvolging van redox-stadia, de ouderdom en de isotopen-samenstelling van het diepere grondwater (Nolte, 1996). De belangrijke infiltratiegebieden van het diepe grondwater in de Centrale Slenk zijn het Kempisch Plateau in België, de hogere gronden ten zuiden van de Maas in Duitsland en de dekzandruggen van Weert en de Drunensche Duinen. Als belangrijkste kwelgebieden gelden de nagenoeg zuidoost-noordwest lopende beekdalen en de polders op de overgang Pleistoceen-Holoceen in het noorden van de Centrale Slenk. De hydrologische situatie van de Centrale Slenk is drastisch veranderd (Van Geer e.a., 1993; Stuurman, 1995; Stuurman, 1996; Stuurman e.a., 1996). Deze veranderingen in de waterhuishouding zijn met name terug te voeren op:

Ronald Hemel was tijdens het schrijven van dit artikel werkzaam bij het Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen NITG-TNO. Zijn huidige adres is Laan van Vollenhoven 2175, 3706 GW Zeist.

Roelof Stuurman is werkzaam bij het Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen NITG-TNO. Zijn werkadres is NITG-TNO, Schoemakerstraat 97, Postbus 6012, 2600 JA Delft, telefoon: (015) 269 60 10, e-mail: r.stuurman@nitg.tno.nl.



Figuur 1: De ligging van de Centrale of Roerdalslenk met de zuidelijke begrenzing van het Nederlandse hydrogeologische systeem door het Brabantse Massief en de Gebirgsrand

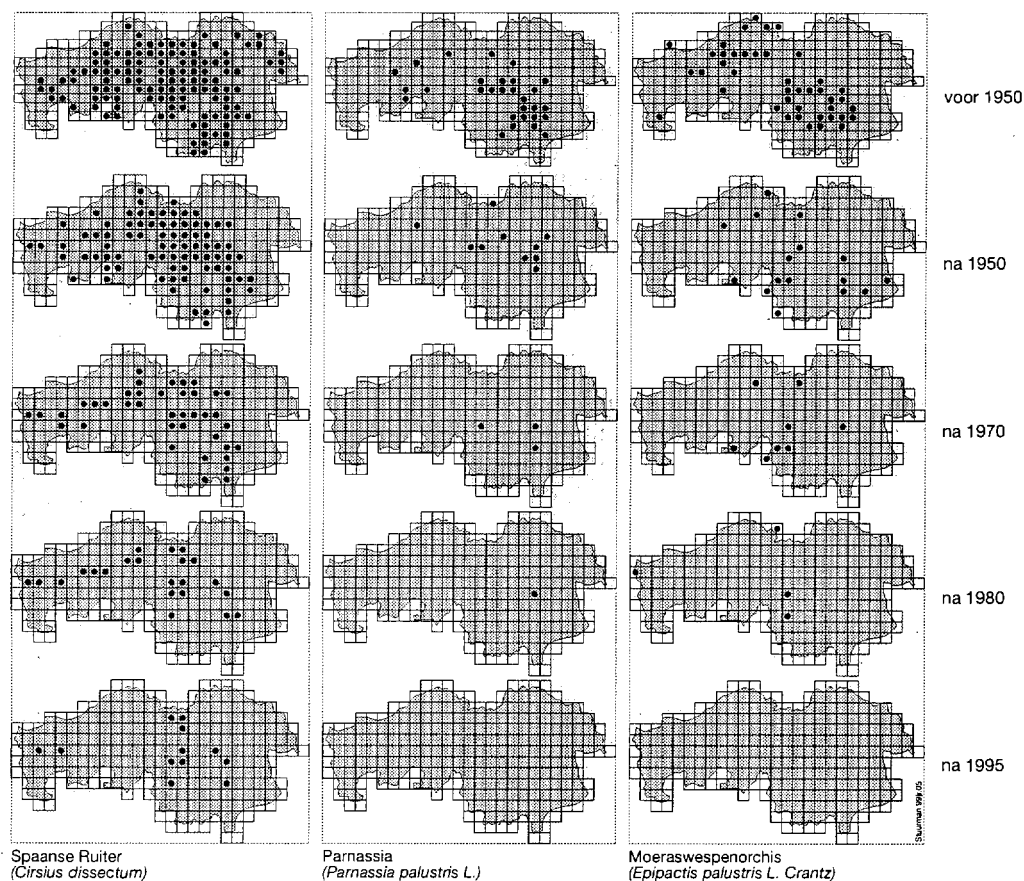
- De vergroting van de onttrekkingen van diep grondwater voor industrieel en agrarisch gebruik en drinkwaterbereiding;
- Het onttrekken van grote hoeveelheden grondwater in bouwputten in Duitsland om bruinkoolwinning mogelijk te maken;
- De toename van de efficiëntie van drainage in infiltratie- en kwelgebieden.

Onderzoek heeft aangetoond dat kwelstroming in de Centrale Slenk sterk is veranderd ten opzicht van de natuurlijke situatie (Van Geer e.a., 1993; Minnema e.a., 1993; Stuurman, 1996; Stuurman en Vermeulen, 1996; Stuurman e.a., 1996). Hiermee geassocieerd is de afname van calciumrijke condities in de wortelzone in kwelgebieden en de afname van plantensoorten karakteristiek voor calciumrijke condities. In figuur 2 wordt deze afname voor enkele karakteristieke kalkgevoelige plantensoorten getoond. De informatie is toegeleverd door Joost Cools, auteur van de Atlas van de Noord-Brabantse flora (1989).

In veel grondwaterafhankelijke natuurgebieden in de Centrale Slenk wordt kalkrijk water aangetroffen. Veelal wordt vermoed dat dit water afkomstig is van diepe grondwaterstromen (Kloosterman en Lekkerkerker, 1995; Stuurman e.a., 1990). Tijdens het doorstromen van met name de mariene formaties in de diepe ondergrond, lossen kalk en schelpen op en wordt het grondwater verrijkt met calcium. Via kwelstroming wordt dit kalkrijke

grondwater richting oppervlak getransporteerd. Hierbij moet vermeld worden dat diepe kwel niet synoniem is met kalkrijke kwel. In natuurgebieden in westelijk Noord-Brabant komt bijvoorbeeld kalkarm water voor dat afkomstig is van diepe kwelstroming (Stuurman, 1993; Stuurman e.a., 1998). De ontwikkeling van de grondwaterkwaliteit van diepe kwelstromen is in veel gevallen afhankelijk van de buffercapaciteit van de ondergrond en, daaraan gekoppeld, de redoxtoestand van het grondwater.

De sedimenten van de ondiepere watervoerende pakketten zijn over het algemeen van fluviatiele oorsprong. In het algemeen wordt beweerd dat deze sedimenten nauwelijks of geen kalk bevatten (Kasse, 1988; Stuurman, 1993; Stuurman e.a., 1996). Aan de andere kant is het voorkomen van kalkrijk sediment in de ondiepere ondergrond uitvoerig gerapporteerd (Bisschops e.a., 1985; Stuurman e.a., 1996; Zagwijn en Van Staalduinen, 1975; Minnema e.a., 1993). Dit betreft met name fluvioglaciale en lacustriene afzettingen die zich onder periglaciale condities hebben ontwikkeld. Deze sedimenten bevinden zich in de



Figuur 2: De verspreiding van enkele plantensoorten in Noord-Brabant (op uurhokbasis) waarvan het voorkomen sterk samenhangt met calciumrijke standplaatsen (Parnassia, Moeraswespenorchis) of met gebufferde standplaatsen (o.a. Spaanse Ruiter). Deze soorten zijn in verspreiding en aantal sterk afgenomen (bron: Joost Cools).

bovenste 25 meter van de ondergrond, in de afsluitende deklaag. Van de onderliggende fluviatiele sedimenten van het eerste watervoerende pakket, is het voorkomen en de ruimtelijke verbreiding van kalk niet bekend. Indien kalk voorkomt, zou het grondwater bij het doorstromen van deze sedimenten verrijkt kunnen worden met calcium. Het voorkomen van kalkhoudend grondwater in de ondiepere ondergrond speelt een belangrijke rol bij het herstel van grondwaterafhankelijke, kalkminnende vegetatiesoorten. Deze rol wordt bedreigd omdat ondiepe grondwatersystemen zich zullen uitbreiden ten faveure van de grotere, regionale systemen, als gevolg van een afname van de diepe kwelstroming (Stuurman, 1993). Deze ondiepere systemen zijn veelal sterk antropogeen beïnvloed. Kennis over de reactiviteit van de ondiepe ondergrond is derhalve gewenst om in de toekomst adequate maatregelen te kunnen treffen bij het herstel van grondwaterafhankelijke ecosystemen.

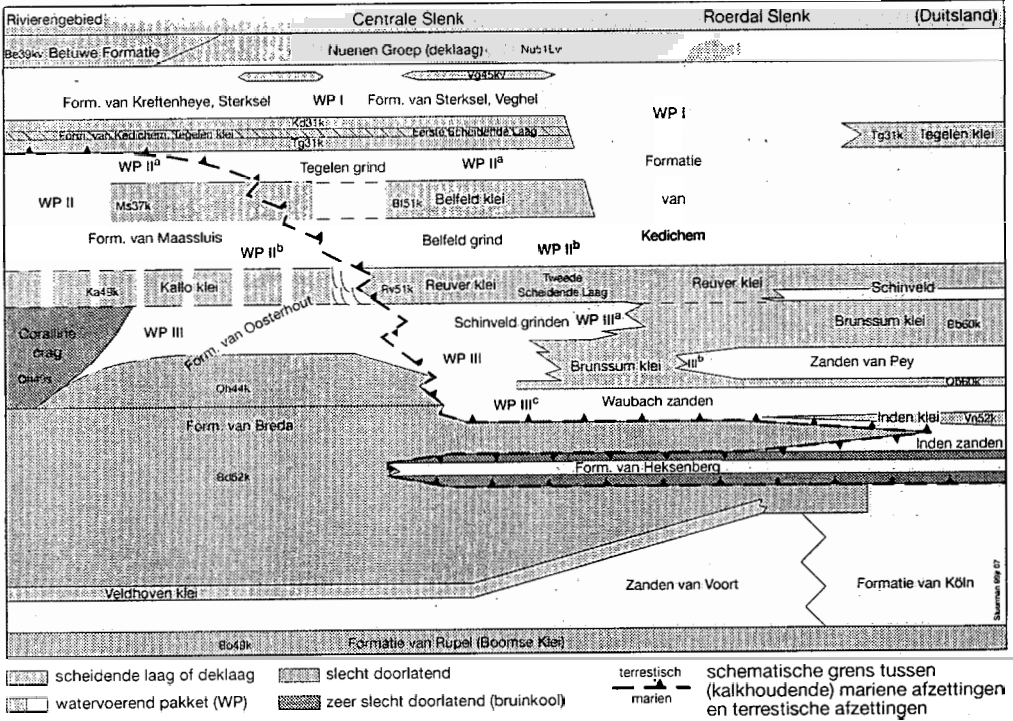
Doelstelling van het onderzoek

Binnen het kader van het SYSNAT-project is onderzoek gedaan naar de ruimtelijke verspreiding van kalkrijk sediment in de ondiepe ondergrond van de Centrale Slenk. Naast de ruimtelijke verspreiding speelt de genese van het kalkrijke sediment een belangrijke rol. Vooral dit laatste aspect helpt om een betere relatie te leggen tussen het voorkomen van kalk en het optreden van calciumrijke kwelstroming als mogelijke bron voor kalkrijk water in natuurgebieden. In het kader van het onderzoek is ook aandacht geschonken aan de genese van kalkvoorkomens in heel Nederland met als doel om meer algemene uitspraken te doen over de kalkrijkdom van bepaalde afzettingen en inzicht te krijgen in hoeverre deze kalk samenhangt met het afzettingsmilieu primair of secundair is gevormd. De resultaten van dit onderdeel zullen in een later stadium worden gepubliceerd. Naast het onderzoek naar de relatie tussen kalk en kwel in de Centrale Slenk heeft eerder onderzoek plaatsgevonden naar de hydro- en isotopenchemie in de slenk (Nolte e.a., 1996) en is de grondwaterstroming gemodelleerd (Stuurman en Vermeulen, 1996). Deze resultaten in combinatie met nog uit te voeren onderzoek moeten leiden tot een beter begrip van de grondwatersituatie in de Centrale Slenk en van de eventuele betekenis van diepe kwel in het bijzonder.

Geologie en geohydrologie van de Centrale Slenk

Voor een gedetailleerde beschrijving van het studiegebied wordt verwezen naar Dienst Grondwaterverkenning TNO (1983). De Centrale Slenk wordt in het noordoosten begrensd door de Peelrand-breuk en in het zuidwesten door de Feldbiss- en de Gilze-Rijen-storing. De Maas vormt de noordelijke begrenzing, terwijl in het zuiden de Nederlands-Duitse grens als begrenzing van het studiegebied is gekozen. Het landoppervlak loopt geleidelijk aan op van zo'n 2 m + NAP in het noordwesten tot ongeveer 30 m + NAP in het zuidoosten. In het noordwesten komen kleiige gronden voor in uitgestrekte polders. Verder zuidwaarts gaat het landschap over in een dekzandrelief. De Centrale Slenk wordt doorsneden door de vier grote beekdalen van de Dommel, de Reusel, de Beerze en de Aa.

De Centrale Slenk is ontstaan als gevolg van verticale verplaatsingen van blokken grond langs breuken aan de noordoostzijde van het Brabants Massief, dat in het Vroeg-Tertiair de zuidelijke grens vormde van het Noordzeebekken. De Centrale Slenk wordt gekenmerkt door relatieve daling. Hier is dan ook sinds het Tertiair een bijna volledige sequentie aan



Figuur 3: Geohydrologische indeling en gidslagen van de Centrale Slenk

sedimenten ontwikkeld, terwijl op de hoger gelegen horsten de afzettingen uit vergelijkbare perioden veel minder goed ontwikkeld zijn of zelfs ontbreken. Hierbij moet wel vermeld worden dat de mate van daling in de Centrale Slenk niet overal even groot is geweest, zodat de verschillende formaties sterk in dikte kunnen variëren. Geohydrologisch gezien kan de Centrale Slenk onderverdeeld worden in een drietal wervoerende pakketten, waartussen scheidende lagen voorkomen. De sedimenten van het Laat-Tertiair zijn ontwikkeld als fijnkorrelige, ondiepe mariene afzettingen. Aan het eind van het Mioceen schoof de kustlijn in een noordwestelijke richting door geleidelijke opheffing van het achterland. De invloed van de zee nam geleidelijk af. In het Vroeg-Pleistoceen verdween de kustlijn helemaal uit Nederland en vond sedimentatie plaats in fluviatiele omgevingen. Deze fluviatiele depositie zette zich voort tot het eind van het Pleistoceen. Bovenop deze sedimenten zijn in het Holoceen afzettingen van lokale oorsprong ontwikkeld.

De geohydrologische schematisatie van de Centrale Slenk is weergegeven in figuur 3. Voor een uitgebreide beschrijving van de verschillende lithostratigrafische eenheden binnen de Centrale Slenk wordt verwezen naar Stuurman e.a. (1996) en Hemel (1997). De ruimtelijke verspreiding van de eenheden wordt weergegeven in Hemel (1997). In tabel 1 is de gemiddelde diepte in meters onder maaiveld van de basis van de verschillende formaties in de Centrale Slenk weergegeven. De gegevens uit tabel 1 zijn gebaseerd op Dienst Grondwaterverkenning TNO (1983) en Hemel (1997).

Tabel 1: Gemiddelde diepte van de basis van verschillende eenheden in de Centrale Slenk (dieptes in meters onder maaiveld).

	Noordelijk deel		Centrale deel		Zuidelijk deel
	west	oost	west	oost	
Betuwe	5-10	5-10	-	-	5-10
Nuenen	5-10	25-30	5-10	25-30	25-30
Veghel	-	30-40	-	30-40	30-40
Kreftenheye	15-20	15-20	-	-	15-20
Sterksel	20-25	70-90	20-25	80-100	80-100
Kedichem	30-40	90-110	30-40	110-135	110-135
Tegelen	40-50	120-175	50-60	175-225	-
Kiezeloöliet	-	-	100	250	250
Maassluis	70-80	200-250	-	-	-
Oosterhout	> 100	> 250	> 150	> 300	-
Breda	> 150	> 350	> 350	> 350	> 350

In dit onderzoek is de Formatie van Breda gekozen als de ondoorlatende basis van het geo-hydrologische systeem. Dit is een fijnkorrelige, mariene afzetting uit het Mioceen en komt voor op een diepte van 350 meter onder maaiveld. De verschillende watervoerende pakketten die in de Centrale Slenk onderscheiden kunnen worden, bestaan grotendeels uit fijn tot matig grof zand en grind met afwisselingen van klei en veen. De slecht doorlatende deklaag is nagenoeg in het gehele studiegebied aanwezig en wordt gevormd door de Nuenen Groep. In het uiterste noordwesten wordt de deklaag gevormd door de kleiige afzettingen van de Betuwe Formatie. De gemiddelde diepte van de basis van het eerste watervoerende pakket is 100-135 meter onder maaiveld. Het geochemisch onderzoek naar het voorkomen van kalkhoudende sedimenten is uitgevoerd voor de sedimenten van de eerder omschreven deklaag en het eerste watervoerende pakket. Deze laatste betreffen de fluviatiele afzettingen van de Formatie van Kreftenheye in het noordwesten en het zuidoosten in de omgeving van de Maas, de Formatie van Veghel in het oostelijk deel van de Centrale Slenk en de Formatie van Sterksel, die in de gehele Centrale Slenk voorkomt. Voor een hydrogeochemische beschrijving van de diepere watervoerende pakketten wordt verwezen naar Nolte (1996).

Op grond van literatuurgegevens en uit figuur 3 en tabel 1 valt op te maken dat in het noordwesten van het onderzoeksgebied mariene afzettingen in de ondiepere ondergrond worden aangetroffen, terwijl in het zuidoosten fluviatiele sedimenten overheersen. In het zuidoosten komen mariene formaties wel in de diepere ondergrond voor. De verticale verdeling van lithostratigrafische eenheden (tabel 1) laat zien dat mariene formaties op variërende dieptes worden aangetroffen. In het noordwesten komen ze voor op een diepte van 100 meter onder maaiveld. In het zuidoosten kunnen deze sedimenten over het algemeen gevonden worden op een diepte van ongeveer 250 meter onder maaiveld. In het zuidwesten, ten westen van de Feldbiss (figuur 1), komen mariene sedimenten voor op een diepte van 100 meter beneden maaiveld. Ten westen van Tilburg komen deze sedimenten veel ondieper voor, op een diepte van 40 à 50 meter beneden maaiveld. Deze ondiepere ligging van de mariene afzettingen wordt veroorzaakt door het complexe breukenpatroon, waarlangs op- en afschuivingen hebben plaatsgevonden.

Resultaten van het onderzoek naar kalkvoorkomen in de Centrale Slenk

Dataverzameling en -verwerking

Bij de beschrijving van het voorkomen en de verbreiding van kalkhoudend sediment in de Centrale Slenk, is de Geologische Database (DINO) van het NITG-TNO bevraagd. Deze database omvat lithologische informatie van de Nederlands ondergrond. De structuur van de database is hiërarchisch, zodat het kan worden bevraagd met een vraagtaal, zoals SQL (Structured Query Language).

Voor een dieptebereik tot 135 m onder maaiveld zijn een vijftal SQL-statements geformuleerd:

- 1 boven- en onderkant van alle lagen die kalk bevatten,
- 2 boven- en onderkant van alle lagen die geen kalk bevatten,
- 3 boven- en onderkant van alle lagen die sideriet (FeCO_3) bevatten,
- 4 boven- en onderkant van alle lagen die schelpen bevatten,
- 5 beschrijving van de schelpen uit statement 4.

Dat de database ook is bevraagd op het voorkomen van sideriet, komt omdat er in veel gevallen een relatie lijkt te bestaan tussen het voorkomen van calcië- en siderietverzadiging van het grondwater (Broers en Griffioen, 1992). Veelal slaat sideriet neer, wanneer ijzerhoudend grondwater onder reducerende omstandigheden kalkrijk sediment doorstroomt. Deze relatie is niet eenduidig en wordt met name beïnvloed door de geohydrologische situatie, het stromingspatroon en, daaraan gekoppeld, de pH en de redoxstatus van het grondwater.

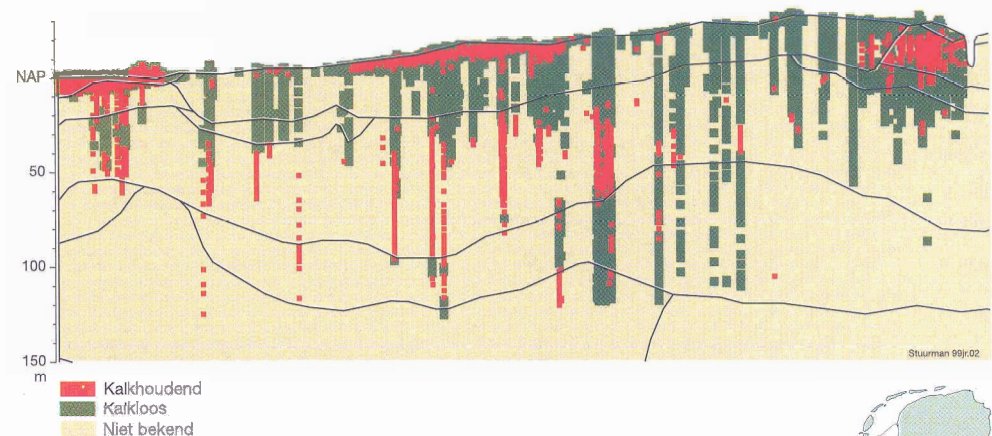
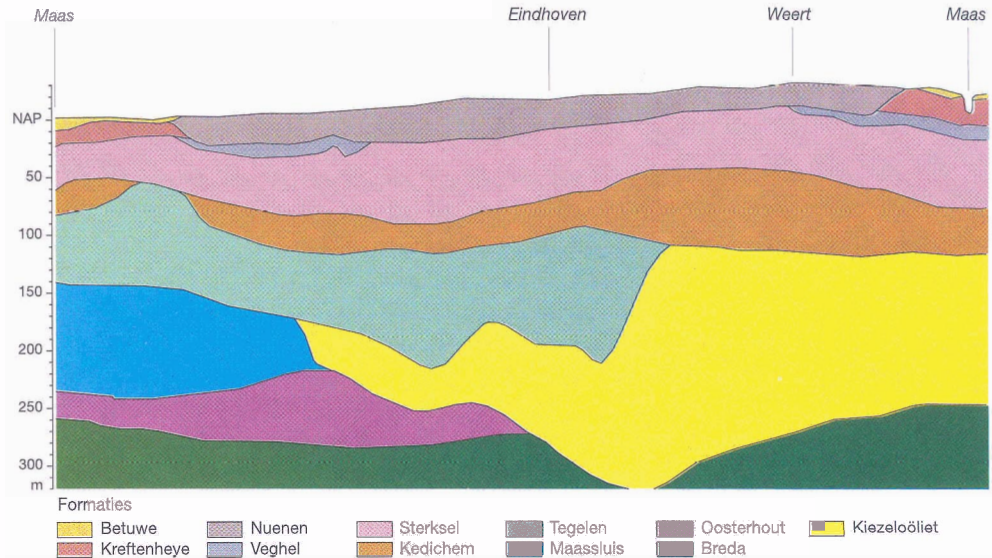
De classificatie resulteerde in 11 nieuwe diepteklassen en wordt weergegeven in tabel 2.

Tabel 2: Classificatie van kalkhoudende en kalkloze lagen in 11 diepteklassen

Diepteklasse	Diepte in meters beneden maaiveld
1	0-5
2	5-10
3	10-20
4	20-30
5	30-40
6	40-50
7	50-60
8	60-80
9	80-100
10	100-120
11	120-140

N

Z



W

O

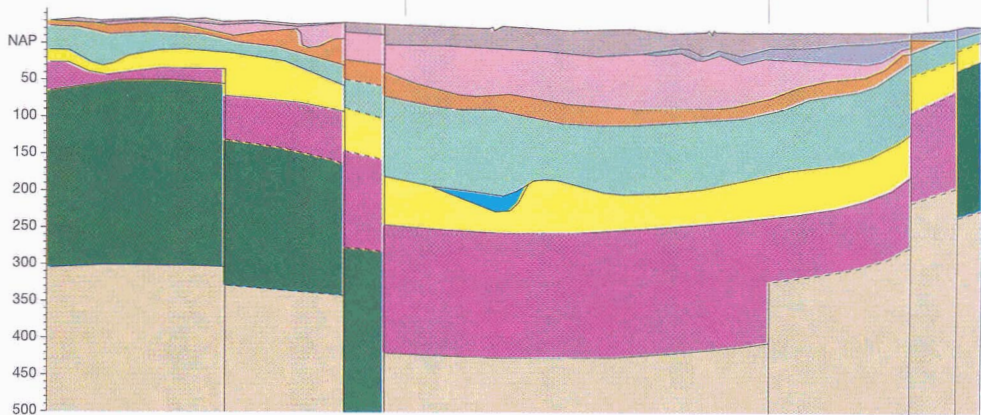
Kempisch Hoog

Veldhoven

Centrale Slenk

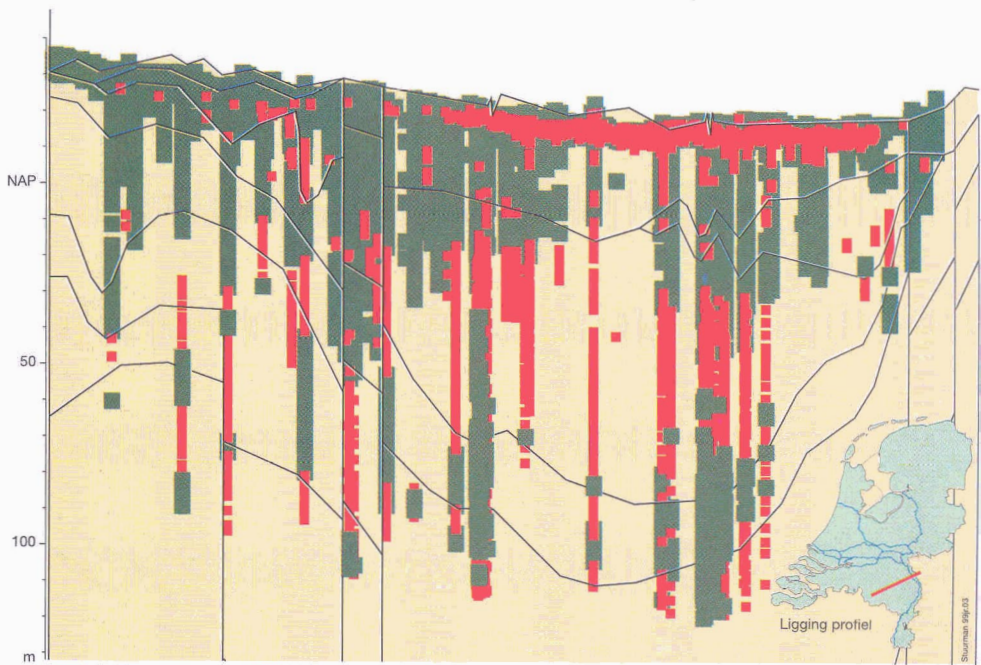
Lieshout

Gemert



Formaties

- | | | | | | |
|-------------|--------|----------|-----------|------------|--------------|
| Betuwe | Nuenen | Sterksel | Tegelen | Oosterhout | Rupel |
| Kreftenheye | Veghel | Kedichem | Maassluis | Breda | Kiezeloëliet |



- | | | |
|-------------|----------|-------------|
| Kalkhoudend | Kalkloos | Niet bekend |
|-------------|----------|-------------|

Ligging profiel

Stuurman 6/9/03

De verschillende conversies resulteerden in een drietal bestanden met daarin het voorkomen van respectievelijk kalk, sideriet en schelpen. Deze bestanden werden gekoppeld aan Arc/Info alwaar figuren zijn geproduceerd per diepteklasse van het voorkomen van kalk, sideriet en schelpen. Voor dit artikel zijn twee figuren vervaardigd voor het voorkomen van kalk langs twee profiellijnen over de Centrale Slenk. De profielen en de ligging van de profiellijnen is weergegeven in figuren 4 en 5. Langs beide profiellijnen is aan weerszijden een zone van 2,5 kilometer gekozen waarbinnen alle datapunten op de profiellijnen zijn geprojecteerd en in de diepte zijn geplot. Tevens is in de profielen de diepteligging van verschillende formaties aangegeven. De gegevens omtrent deze formaties zijn verkregen bij het NITG in Haarlem en in Heerlen. Het voorkomen van zowel kalk, sideriet en schelpen zal hieronder kort besproken worden. Voor een uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar Hemel (1997).

Kalk Met betrekking tot het voorkomen van kalk moet in acht genomen worden dat de meeste datapunten zich bevinden in het noordwesten van de Slenk, in het centrale deel rond Eindhoven en in het uiterste zuidoosten van de Slenk. In de ondiepe ondergrond van de Centrale Slenk, tot een meter of tien, komt kalk in zones voor in het noordwesten en het centrale deel rond Eindhoven. In het zuidoosten langs de Maas komt op een diepte van vijf tot dertig meter beneden maaiveld een zone met kalk voor. In de Centrale Slenk is het sediment tussen tien en veertig meter beneden maaiveld nagenoeg kalkvrij. Het voorkomen van kalk is hier beperkt tot het noordwesten, het zuidoosten en de gebieden langs breuken in het westen van het studiegebied. Vanaf een diepte van veertig à vijftig meter komt kalk veelvuldig voor in het hele studiegebied. Voor deze diepte kunnen echter geen duidelijke zones worden onderscheiden, het voorkomen van kalk is heterogeen over het studiegebied verdeeld.

Sideriet Datapunten met betrekking tot sideriet zijn minder talrijk dan de datapunten van kalk. Veel datapunten komen voor langs breuken in het westen en oosten. In de Centrale Slenk zelf komen de meeste datapunten voor in het centrale deel. In de bovenste veertig meter van de ondergrond zijn de sedimenten van de Centrale Slenk siderietvrij. Het voorkomen van sideriet van twintig tot vijftig meter beneden maaiveld lijkt sterk gerelateerd aan het voorkomen van breuken in het oosten en westen. Tot veertig à vijftig meter is er in het patroon weinig overeenkomst met het voorkomen van kalk. Vanaf een meter of veertig komt sideriet ook voor in de sedimenten van de Slenk zelf. Het voorkomen van sideriet is heterogeen verdeeld over het studiegebied en er komen dan ook geen duidelijke zones met sideriet voor in de diepere ondergrond. Het voorkomen van sideriet vertoont vanaf veertig meter overeenkomsten met het voorkomen van kalk. Wel moet worden vastgesteld dat het aantal datapunten met betrekking tot sideriet schaarser zijn op grotere diepte.

Schelpen De datapunten met betrekking tot schelpen zijn met name gesitueerd in het noordwesten, ten westen van Tilburg en in het centrale deel van de Centrale Slenk. In het zuidoosten komen nagenoeg geen datapunten voor. Het voorkomen van schelpen in de eerste tien meter toont één grote gelijkenis met het voorkomen van kalk. Schelpen komen hier voor in het noordwesten en het centrale deel van de Slenk. Ten westen van Tilburg zijn de sedimenten schelpvrij. In het zuidoosten langs de Maas komen lokaal schelpen voor, maar

over het algemeen zijn de sedimenten ook hier schelpvrij. Van tien tot veertig meter zijn de sedimenten nagenoeg schelpvrij over het gehele studiegebied. Vanaf veertig meter komen schelpen voor ten westen van Tilburg, in het noordwesten en verspreid in het noordelijke deel van de Centrale Slenk, behalve tussen 80 en 100 meter beneden maaiveld. De Geologische Database leverde ook gegevens omtrent de schelpensoorten die in de Centrale Slenk voorkomen (statement 5). De verschillende schelpensoorten zijn geïnclassificeerd naar herkomst (weergegeven in tabel 3).

Tabel 3: De soorten en herkomst van schelpen voorkomend in de Centrale Slenk, geïnclassificeerd in zoetwaterschelpen en mariene schelpen

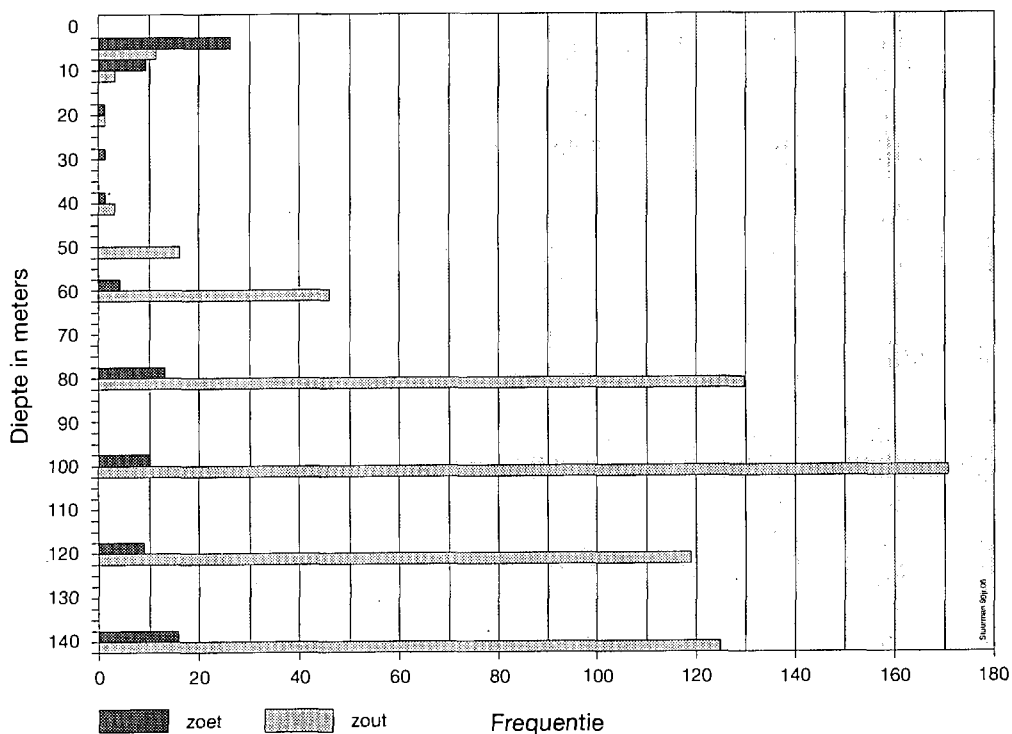
Soorten	Herkomst	Soorten	Herkomst
Angulus	mariene	Macoma	mariene
Arctica islandica	mariene	Maetra corallina	mariene
Astaridae	mariene	Mya	mariene
Bithyniidae	zoet	Mytilus edulis	mariene
Cerastoderma	mariene	Ostracoda	mariene
Chamelea gallina	mariene	Ostrea edulis	mariene
Corbula gibba	mariene	Pectinidae	mariene
Ensis	mariene	Scrobicularia plana	mariene
Euspira	mariene	spisula	mariene
Gastropoda	mariene/zoet	Turritella	mariene
Hinia	mariene	Venerupis	mariene
Hydrobiidae	mariene	Vivigaris glacialis	zoet
Littorina	mariene	Yoldia	mariene

Uit tabel 3 blijkt dat het overgrote deel van de schelpen uit de Centrale Slenk van mariene herkomst is. Van de in totaal 1399 waarnemingen omtrent schelpensoorten, blijken slechts 112 waarnemingen van zoetwaterschelpen. Gastropoda, slakken die zich zowel onder mariene als onder zoetwatercondities ontwikkelen, komen slechts drie keer voor. Zoetwaterschelpen komen voor in het noordwesten langs de Maas en in het centrale deel van de Centrale Slenk. Mariene soorten komen met name voor ten westen van Tilburg en in het noordwesten, maar ook lokaal in de Centrale Slenk zelf. Als alleen gekeken wordt naar het voorkomen van mariene schelpen en zoetwaterschelpen, levert dit na classificatie een totaal aantal puntlocaties op van 715. Hiervan komen bij 625 punten ergens in het profiel mariene schelpen voor. Slechts bij 90 locaties komen zoetwaterschelpen voor. De frequentieverdeling van zoete en zoute schelpen per diepteklasse in de Centrale Slenk is weergegeven in figuur 6. Uit de figuur blijkt dat mariene schelpen met name vanaf een meter of veertig veelvuldig voorkomen. Tussen de tien en de veertig meter komen nauwelijks schelpen voor.

Interpretatie en koppeling aan lithostratigrafie

In het algemeen is het voorkomen van kalkhoudend sediment gerelateerd aan het voorkomen van mariene formaties. Zoals uit tabel 1 blijkt, komen mariene formaties in de Centrale Slenk op grote diepte voor. In het zuidwesten worden ze dichter onder het oppervlak

Frequentieverdelingen zoete en zoute schelpen



Figuur 6: De frequentieverdeling van zoete en zoute schelpen over de diepte voor de Centrale Slenk

aangetroffen, op een diepte van ongeveer 100 meter beneden maaiveld. In het gebied ten westen van Tilburg komen mariene formaties nog dichter onder het oppervlak voor, op een diepte van 40 à 50 meter beneden maaiveld. De ondiepe ligging van de mariene formaties wordt bepaald door het complexe breukenpatroon van de Gilze-Rijen-storing. Uit de resultaten van het geochemisch onderzoek blijkt dat kalkhoudend sediment tevens voorkomt in de ondiepere ondergrond van de Centrale Slenk, die opgebouwd is uit fluviaatiele sedimenten van Rijn en Maas en eolische periglaciale sedimenten.

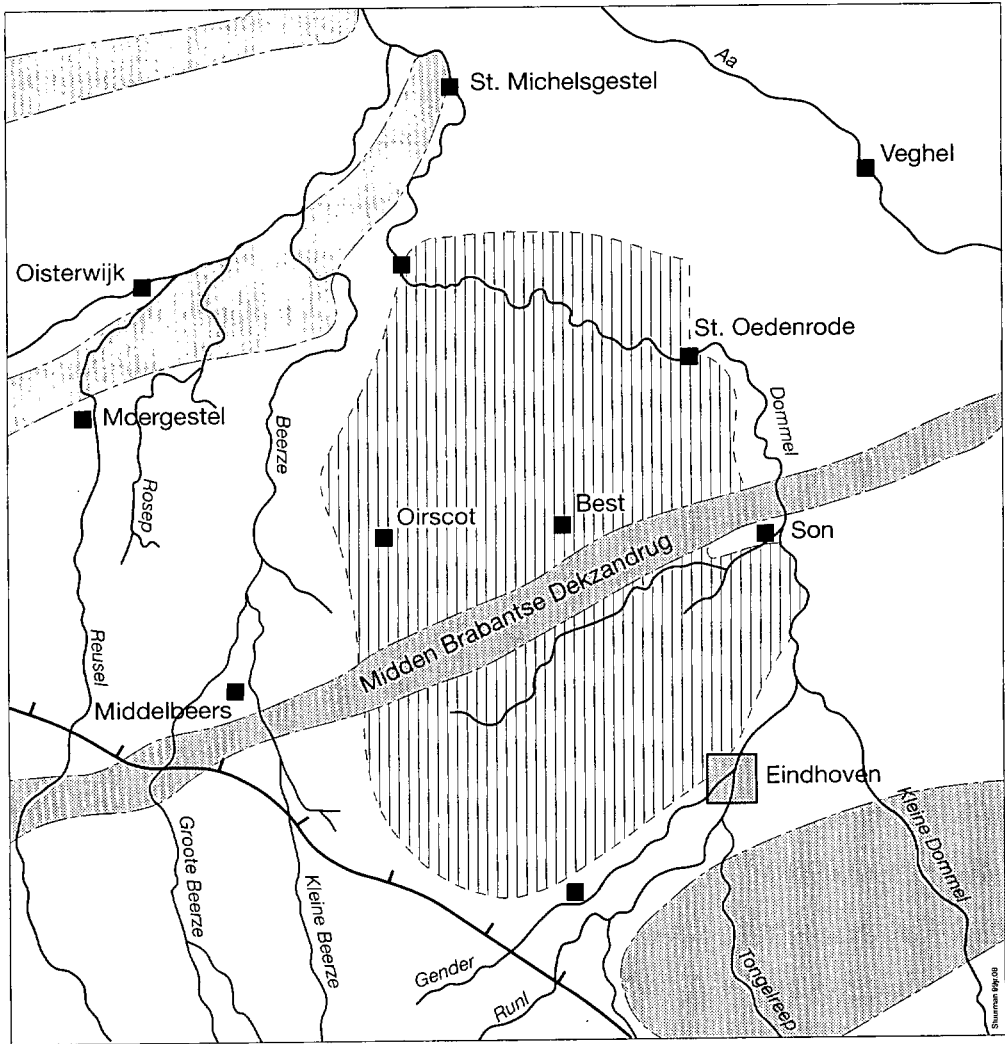
In de ondiepe ondergrond komt kalk met name voor in het noordwesten en het centrale deel van de slenk. In het noordwesten worden de Formaties van Kreftenheye en Betuwe in de ondiepe ondergrond aangetroffen. De Betuweformatie is hier grotendeels afgezet door de Maas. De Betuweformatie bestaat uit fijne afzettingen. Onderzoek naar sedimenten van de Rijn in de Betuwe toont aan dat het voorkomen van kalk gerelateerd is aan het slibgehalte (< 16 mm) van het sediment (Egberts, 1950). Uit onderzoek blijkt dat het kalkgehalte het grootst is bij gronden met ongeveer 30–35% slib. Daarentegen bevatten gronden met 60–65% slib geen kalk meer. Bekend is dat de jonge rivierafzettingen van de Maas door bijmenging van löss tot aan Venlo kalkhoudend zijn (Stiboka, 1972). Benedenstrooms van Venlo zijn deze afzettingen nagenoeg kalkloos door toevoer van zuur veenwater uit het Peelgebied (Hoeksema, 1953; Van den Broek, 1966; Van Diepen, 1968). In het noordwesten



komt kalkhoudend sediment in de diepere ondergrond minder frequent voor dan in de ondiepe ondergrond: kalkhoudend sediment is gerelateerd aan het voorkomen van de Betuweformatie. Kalkhoudend sediment komt echter ook voor tot dieptes van vijftien tot twintig meter. De Formatie van Kreftenheye bevat veel kalkhoudend sediment (figuur 4). Dit wordt bevestigd door het voorkomen van kalkhoudend sediment in het zuidoosten vlak bij de Maas. Hier wordt kalk aangetroffen op een diepte van twintig tot dertig meter. Dit is in contrast met de resultaten van Moura en Kroonenberg (1990) die aantoonde dat de grove sedimenten van de Formatie van Kreftenheye in het noorden van Limburg nagenoeg kalkvrij zijn. Dit komt vermoedelijk doordat kalk zich in de fijnere afzettingen bevindt, welke niet onderzocht werden. Voor fluviatiele sedimenten geldt in het algemeen dat het kalkgehalte afneemt met toenemende korrelgrootte. Het voorkomen van kalk geeft waarschijnlijk aan dat er sprake is van beïnvloeding door grondwater. De hier aangetroffen kalkrijke sedimenten bevinden zich namelijk in een kwelgebied. Mogelijk zijn de sedimenten kalkrijk afgezet en door de kwelsituatie niet uitgeloozd terwijl ook de mogelijkheid bestaat dat de afzettingen juist kalkrijk zijn geworden onder invloed van calciumrijke kwel tijdens de sedimentatie.

In het centrale deel van het studiegebied wordt een grote zone met kalkhoudend sediment aangetroffen tot een diepte van vijf à tien meter. In het centrale deel van de Centrale Slenk zijn kalkhoudende sedimenten eerder beschreven (Bisschops, 1973; Bisschops e.a., 1985; Minnema e.a., 1993). Deze voorkomens zijn vaak gerelateerd aan het voorkomen van kalkhoudende, zoetwaterschelpen bevattende leemlagen binnen de Nuenen Groep, de zogenaamde Brabantse Leem. Het voorkomen van kalkhoudend sediment komt hier grofweg overeen met de verbreiding van de Brabantse Leem, zoals die beschreven is door Bisschops e.a. (1985) en is weergegeven in figuur 7. De Brabantse Leem omvat eolische sedimenten die in een periglaciaal milieu zijn afgezet in ondiepe, vochtige depressies en meren (dooimeren) tijdens het Midden- en Laat-Pleistoceen. De ontwikkeling van dergelijke dooimeren wordt toegeschreven aan gebrekkige drainage als gevolg van de tektonisch lage ligging in het centrale deel van de slenk. De oudere delen van de Nuenengroep zijn meestal kalkarm.

De kalk is grotendeels secundair afgezet onder invloed van bacteriën, plantengroei en de depositie van zoetwaterschelpen. Mogelijk hangt de kalkrijkheid van de top samen met het ontstaan van calciumrijke kwel aan het eind van het Pleistoceen. Ook nu nog staat het grootste deel van dit gebied onder invloed van opstijgend calciumrijk grondwater.

Tussen de 10 en 40 meter beneden maaiveld bevatten de sedimenten in de Centrale Slenk nagenoeg geen kalk hetgeen betekent dat de onderste delen van de Nuenen Groep en pakweg de bovenste 10 meter van de formatie van Sterksel kalkloos zijn (zie figuur 5). De onderste delen van de Nuenen Groep bestaan uit fluvioperiglaciale en eolische verspoelde sedimenten. Veelal zijn de sedimenten door stromend water afgezet of verspoeld, waardoor de afzettingen kalkloos zijn afgezet of later door infiltrerend zuur (regen-)water zijn uitgeloozd. De sedimenten van de Formatie van Sterksel bestaan uit fijne tot matig grove zanden en grind, afgezet door de Rijn en Maas. In het westen van Noord-Brabant en ten zuidwesten van het studiegebied op het Kempisch Plateau komt de Formatie van Sterksel op of nabij het oppervlak voor. In deze gebieden komt tot op een diepte van 40 tot 50 meter beneden maaiveld kalkloos sediment voor. Kasse (1988) schreef dit toe aan postsedimentaire ontkalking van de vroegpleistocene afzettingen na geleidelijke uplift van het achterland in het Midden-Pleistoceen. Hierdoor trad in het westen van Noord-Brabant erosie op, terwijl



-  Omvangrijk dekzandcomplex
-  Het centrale leemgebied

Figuur 7: Schematisch overzicht van de verspreiding van de Brabantse Leem en van de belangrijkste dekzandruggen (bron: Bisschops e.a., 1985)

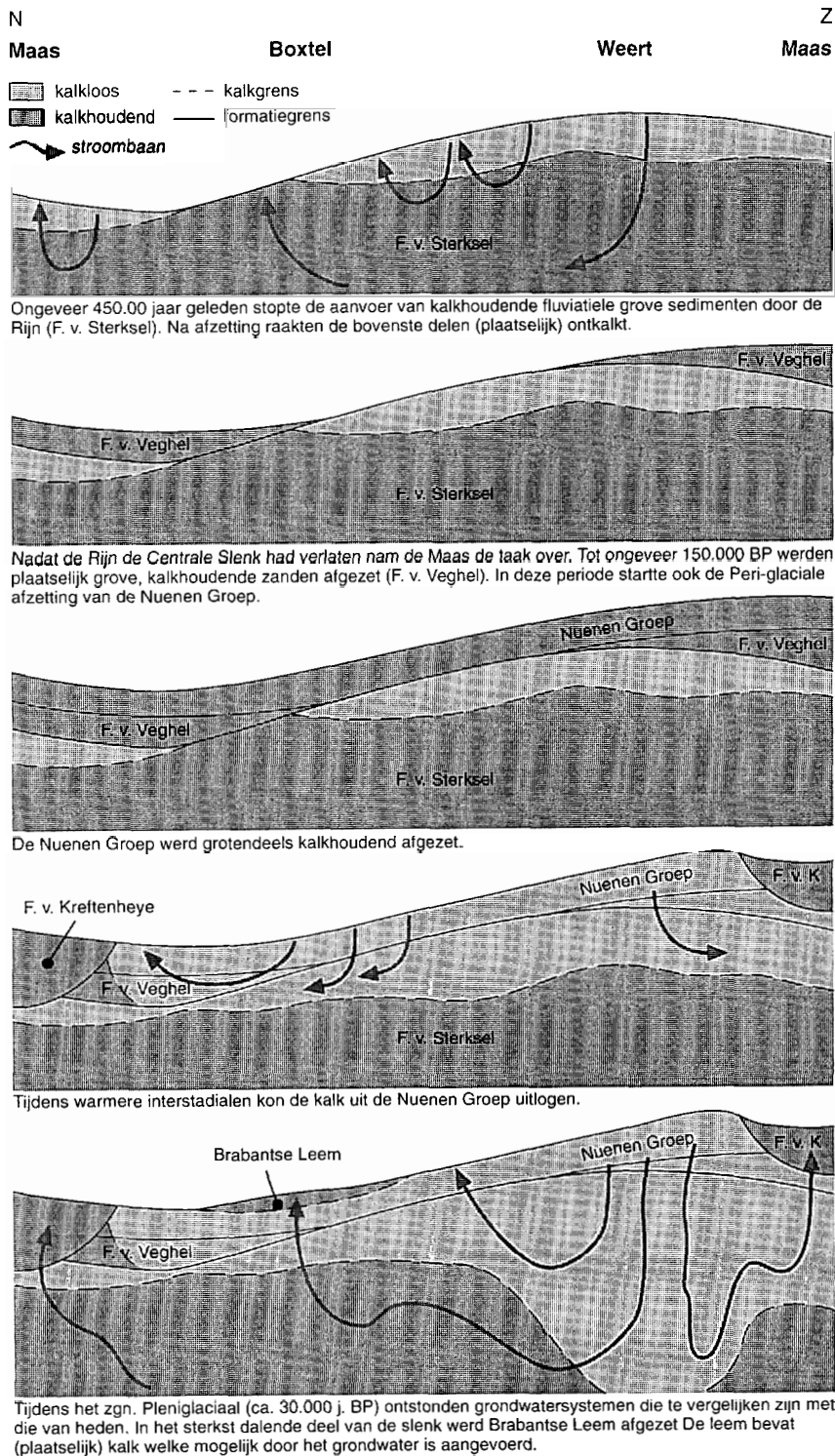
sedimentatie van Rijn en Maas in de Centrale Slenk stopte. De aanwezigheid van siderietconcreties toont aan dat de ontkalking door grondwaterstroming heeft plaatsgevonden onder reducerende omstandigheden. De ontkalkingsdiepte wordt ook weerspiegeld in de grondwatersamenstelling: het grondwater in het westen van Noord-Brabant is onderverzadigd ten opzichte van calciet tot een diepte van 40 tot 60 meter beneden maaiveld (Stuurman e.a., 1990). In het Midden-Pleistoceen lag de Formatie van Sterksel ook in de Centrale Slenk aan de oppervlakte. Postsedimentaire ontkalking van deze sedimenten tijdens het Midden-Pleistoceen is veel minder intens geweest dan die in het westen van Noord-Brabant. De sedimenten zijn in de slenk slechts tot een meter of 10 ontkalkt. De geringe ontkalkingsdiepte kan grotendeels verklaard worden uit de tektonische ligging van het studiegebied. De Centrale Slenk is een laaggelegen gebied met een komvormige structuur. Hierdoor ligt de grondwaterspiegel relatief dicht onder maaiveld, zodat diepe ontkalking niet optreedt. Een grotere ontkalkingsdiepte wordt in latere perioden ook tegengewerkt door de aanwezigheid van al dan niet calciumrijke diepe kwelfluxen, zoals die in het centrale deel van het studiegebied aanwezig zijn, met name rond de beekdalen. In infiltratie-gebieden is de ontkalking aanzienlijk groter geweest. In het gebied rondom Weert vindt van oudsher infiltratie plaats. Op grote diepte zijn hier de sedimenten ontkalkt, zo ook de sedimenten van de Formatie van Sterksel. Alleen de onderste delen van de formatie zijn nog kalkhoudend. Het lijkt er dus op dat deze grovere rivierafzettingen kalkhoudend zijn afgezet en tijdens het riviertransport niet volledig zijn ontkalkt (zie Pomper, 1988).

In het zuidoosten vormen de sedimenten van de Formatie van Kedichem het grootste deel van het eerste watervoerende pakket. Uit het voorkomen van kalk, sideriet en schelpen (Hemel, 1997) kan worden afgeleid dat kalkhoudende sedimenten nagenoeg niet voorkomen in de Formatie van Kedichem. Hierbij moet wel vermeld worden dat datapunten in het zuidoosten schaars verdeeld zijn. Kalkhoudend sediment komt in de formatie sporadisch voor en is met name geconcentreerd in het centrale deel van het studiegebied (zie figuur 4). Uit de figuur valt ook op te maken dat de sedimenten van de Formatie van Kedichem te onderscheiden zijn van de onderste sedimenten van de Formatie van Sterksel, die kalkhoudend zijn. Dit zou een aanwijzing kunnen zijn dat de Formatie van Sterksel in beginsel kalkrijk is afgezet en later is ontkalkt, zoals boven beschreven is. Dit is in tegenstelling met eerdere ideeën dat fluviatiele zandige tot grindrijke sedimenten van de ondiepe ondergrond in de Centrale Slenk kalkloos zijn. Onder de Formatie van Kedichem ligt de Formatie van Tegelen die ook kalkhoudend sediment bevat (figuur 4). De Kedichem/Tegelen-kleilaag vormt in de Centrale Slenk de eerste slechtdoorlatende laag (figuur 3). Het voorkomen van kalk in deze laag is eerder beschreven door Kloosterman en Lekkerkerker (1995). Zij vonden dat kwellend grondwater verrijkt kan worden als gevolg van het oplossen van kalk in de Kedichem/Tegelen-kleilaag. Uit figuur 4 blijkt dat het merendeel van de kalk in deze kleilaag tot de Formatie van Tegelen behoort. Als geheel bekeken kan er op grond van het kalkgehalte moeilijk een onderscheid gemaakt worden tussen de Kedichem/Tegelen-kleilaag en de Formatie van Sterksel. In beide gevallen komt kalk voor, met name in het centrale deel van het studiegebied.

Andere informatiebronnen over de aanwezigheid van kalk

De beschrijving van het voorkomen van kalkhoudend sediment is in dit artikel vooral gebaseerd op de bewerking van de gegevens van de Geologische Database van het NITG-TNO. Het voorkomen van kalk is in deze gevallen afgeleid uit de lithologische beschrijvingen van boormonsters. Naast de lithologische beschrijving van kalk is het voorkomen van kalkhoudend sediment echter ook bekend uit andere bronnen, zoals de bodemkaart en de beschrijving van aardkundig waardevolle terreinen. Het voorkomen van kalkhoudende afzettingen uit andere bronnen dan de Geologische Database zal hieronder kort besproken worden.

Bij de beschrijving van kaartenheden in de bodemkaart worden kalkhoudende afzettingen weergegeven middels een codering. In Noord-Brabant en Limburg worden kalkrijke bodems aangetroffen in het noordwesten en zuidoosten langs de Maas, de zogenaamde kalkrijke, jonge rivierkleigronden (Van Diepen, 1968; Van den Broek, 1966). Op de hoger gelegen pleistocene zandgronden komen over het algemeen kalkloze bodems voor. Wel komen leem- en lössgronden voor die plaatselijk kalkhoudend kunnen zijn. De typische kalkrijke löss wordt echter niet in het studiegebied aangetroffen, maar komt voor in Zuid-Limburg tot aan Sittard en in Duitsland. In veel gevallen wordt kalkrijk materiaal aangetroffen in bodems in laaggelegen delen van het landschap waar van nature een slechte ontwatering heeft plaats gevonden. Veelal is de kalk dan geassocieerd met het voorkomen van venige, humeuze lagen en leem en is vaak van secundaire oorsprong. Deze bodems (met name beekerdgronden en moerige podzolen) worden veelal aangetroffen rond de beekdalen waar door kwelstroming de grondwaterstand vrij dicht onder het oppervlak staat. In de omgeving van Weert wordt ook kalk in het bodemprofiel aangetroffen, ondanks dat het gebied van nature een infiltratiegebied is en er diepe ontkalking heeft opgetreden. Kalkrijke lagen worden aangetroffen in jonge rivierkleigronden en moeraskalk wordt aangetroffen in het profiel van een moerpodzol (Bles e.a., 1978). Het grootste voorkomen van moeraskalk wordt aangetroffen nabij Susteren (Florschütz, 1941; Van Baren, 1923). Het beslaat een gebied van 50–60 ha en is ruim twee meter dik. De moeraskalk is gevormd uit kalk afkomstig van organismen die in ondiepe wateroppervlakten voorkwamen tijdens het Laat-Pleistoceen. Tijdens het Holoceen is er een laag veen afgezet over de moeraskalk. De kalk is in 1919 en 1920 gedeeltelijk gewonnen ten behoeve van de landbouw. Het voorkomen van gyttja is met name beperkt tot het centrale deel van het studiegebied, waar op het eind van het Pleistoceen ondiepe meren en depressies voorkwamen, waarin lemig materiaal werd afgezet. Geassocieerd met de leem komen venige en humeuze lagen voor evenals lagen kalkgyttja (Bisschops e.a., 1985). Onduidelijk is echter of het om grote voorkomens gaat. Daarnaast is niet alle gyttja kalkrijk, wat waarschijnlijk te wijten valt aan de voedselarme omstandigheden in het centrale deel van het studiegebied aan het eind van het Pleistoceen. Hierdoor was de produktie van organisch plantenmateriaal erg klein, zodat chemische neerslag van kalk door fotosynthese nauwelijks optrad.



Figuur 8: Een schematische weergave van het ontstaan van het actuele kalkvoorkomen in een noord-zuid-profiel door de Centrale Slenk gedurende het Midden- en Laat-Pleistoceen,

Discussie en enkele conclusies

Zoals bekend hangt de kwaliteit van natuurwaarden in veel kwelgebieden samen met de basenrijkdom van het opstijgende grondwater. Naast dit calciumgehalte en de daarmee in verband staande zuurgraad spelen ook het zuurstofgehalte en het ijzergehalte een belangrijke rol. In dit artikel is geprobeerd het inzicht ten aanzien van herkomst van calciumrijke kwel te vergroten. Vaak wordt ervan uit gegaan dat calciumrijk kwelwater afkomstig is van de diepere mariene pakketten. Dit artikel laat echter zien dat ondiepe fluviaatiele en fluvio-periglaciaale afzettingen in de slenk ook kalkhoudend kunnen zijn.

De grove, grindrijke, grotendeels door de Rijn afgezette Formatie van Sterksel blijkt kalkhoudend te zijn afgezet. Direct na de afzetting (ca. 450.000 jaar BP) startte de ontkalking. De ontkalkingsdiepte verschilt sterk als gevolg van het grondwaterstromingspatroon. Onder infiltratiegebieden kan de Formatie van Sterksel volledig ontkalkt zijn terwijl deze onder kwelgebieden zijn kalkgehalte grotendeels behouden lijkt te hebben. Het ontkalkingspatroon van de fluviaatiele Sterkselafzettingen weerspiegelt sterk het actuele grondwaterstromingssysteem. De plaatselijk op de Formatie van Sterksel rustende grove zanden van de Formatie van Veghel zijn door de Maas kalkrijk afgezet. Naderhand is deze afzetting tijdens de afzetting van de Nuenen Groep (tussen ca. 450.000–10.000 BP) sterk uitgelooft. De relatief jonge grofzandige Formatie van Kreftenheye is binnen het studiegebied tussen 125.000 en 10.000 BP afgezet en nog steeds kalkrijk. Het behouden kalkgehalte heeft te maken met de ruimtelijke positie van deze afzetting langs de rivier de Maas (kwel!) en de geringe ouderdom. Ook de holocene Betuweafzettingen zijn om deze reden kalkhoudend.

Opmerkelijk is dat in het centrum van de Centrale Slenk (Boxtel e.o.) de top van de deklaag (Nuenengroep) kalkrijk is terwijl de diepere delen kalkloos/arm zijn. Vermoedelijk is de Nuenen Groep oorspronkelijk kalkhoudend afgezet maar later bijna geheel ontkalkt. De ondiepe kalkrijke afzettingen zijn ca. 30.000 jaar geleden ontstaan doordat aan het eind van het Pleistoceen zich in het centrum van de slenk een moerasachtig gebied ontwikkelde waarin kalkrijke sedimenten werden afgezet. De kalkbron kon bestaan uit kalkrijk moeder materiaal of calciumrijke kwel vanuit de Sterkselafzettingen en/of diepere mariene afzettingen. Het vermoeden bestaat dat deze calciumrijke kwel een belangrijke rol speelde omdat dit gebied ook nu nog sterk onder invloed van kwel staat. In figuur 8 is getracht de ontwikkeling van de kalkverbreiding in de Centrale Slenk te schetsen.

Uit het voorgaande blijkt dat hier moeilijk op basis van het calciumgehalte een uitspraak over de herkomst van kwelwater gedaan kan worden. Wel is het zeer goed mogelijk dat kalk in de Brabantse Leem een gevolg is van het optreden van calciumrijke kwel en onder natuurlijke omstandigheden niet de oorzaak van calciumaanrijking. Uit isotopenonderzoek van Nolte (1996) bleek dat zowel calciumrijke kwel vanuit de Formatie van Sterksel als vanuit de diepe mariene pakketten opstijgt/opsteeg. Het is niet bekend of deze watertypen verder vergelijkbaar zijn (ijzergehalte, redoxmilieu). Wel is bekend dat de 'Sterkselkwel' reistijden in de orde van tientallen tot honderden jaren kent terwijl de 'diepe kwel' reistijden van duizenden tot tienduizenden jaren kende. Het grondwater in het ondiepe watervoerende pakket is derhalve kwetsbaar voor vervuiling. De van oorsprong 'diepe kwel' ontvangende natuur zal zeker al om deze laatste reden in het nadeel zijn als deze wordt verruild voor ondiepere 'Sterkselkwel'.

Aan het slot kan geconcludeerd worden dat een geochemische kartering een nuttig instrument kan zijn bij het verklaren van grondwaterstroming of het bepalen van kwetsbare gebieden.

Dankwoord

De auteurs werden tijdens het project geholpen door Ton Kremers, Willem van den Berg, Ronald Pouwer en Jean Wijers, allen van het NITG-TNO. Tevens is dank verschuldigd aan de redactie van Stromingen, Perry de Louw en Gijs Remmelts voor nuttige aanwijzingen.

Gebruikte literatuur

- Amstel, A.R. van, A.C. Garritsen en H.L.M. Rolf (1989)** Verdroging van natuur en landschap. Het technisch rapport. Deelrapport hydrologie. Februari 1989.
- Baren, J. van (1923)** Kalk en kalkverbindingen in Nederland; Granen, veevoeder, kunstmest; in: ???, jrg 1, pag 478–492.
- Bisschops, J.H. (1973)** Toelichting bij de geologische kaart van Nederland 1:50.000. Blad Eindhoven Oost (51O); Rijks Geologische Dienst, Haarlem.
- Bisschops, J.H., J.P. Broertjes en W. Dobma (1985)** Toelichtingen bij de geologische kaart van Nederland 1:50.000. Blad Eindhoven West (51W); Rijks Geologische Dienst, Haarlem.
- Bles en ???, (1978) ???**
- Broek, J.M.M. van den (1966)** De bodem van Limburg. Toelichting bij blad 9 van de bodemkaart van Nederland, 1:200.000; Stiboka, Wageningen.
- Broers, H.P. en J. Griffioen (1992)** Het grondwaterkwaliteitsmeetnet van de provincie Noord-Brabant: opzet en eerste resultaten; in: *H₂O*, jrg 25, pag 728–735.
- Cools, J.M.A. (1989)** Atlas van de Noord-Brabantse flora; Natuurhistorische bibliotheek van de KNNV, nr 51.
- Dienst Grondwaterverkenning TNO (1983)** Grondwaterkaart van Nederland, de Centrale Slenk.
- Diepen, D. van (1948)** De bodemkartering aan de Maaskant; in: *Boor en Spade* I, pag 35–40.
- Diepen, D. van (1952)** De bodemgesteldheid van de Maaskant; in: *De bodemkartering van Nederland*, deel XIII, Verslagen Landbouwkundig Onderzoek 58. 9, 's-Gravenhage.
- Diepen, D. van (1968)** De bodem van Noord-Brabant. Toelichting bij blad 8 van de bodemkaart van Nederland, 1:200.000; Stiboka, Wageningen.
- Egberts, H. (1950)** De bodemgesteldheid van de Betuwe; in: *De bodemkartering van Nederland*, deel VIII, Verslagen Landbouwkundig Onderzoek 56. 19, 's-Gravenhage.
- Florschütz, F. (1941)** Laatglaciale afzettingen in Midden- en Noord-Limburg: Moeraskalk van Gulickshof en klei aan de voet van den St. Jansberg; in: *Tijdschrift KNAG*, jrg LVIII, pag 934–939.
- Ford, T.D. en H.M. Pedley (1996)** A review of tufa and travertine deposits of the world; in: *Earth-Science-Review*, jrg 4.

- Geer, F.C. van, S. Bloemendaal, A.H.M. Kremers en A. Lourens (1993)** Ontwikkeling van de diepe stijghoogte en de relatie met de ondiepe stijghoogte in Noord-Brabant; TNO rapport OS 93-67B.
- Hemel, R.B.J. (1997)** Calcareous sediments in the Central Graben structure in the south of the Netherlands; Intern rapport NITG-TNO, Delft.
- Hoeksema, K.J. (1953)** De natuurlijke homogenisatie van het bodemprofiel in Nederland; in: *Boor en Spade*, Vim, pag 24–30.
- Kasse, C. (1988)** Early-Pleistocene tidal and fluvial environments in the southern Netherlands and Northern Belgium; proefschrift Vrije Universiteit, Amsterdam.
- Kloosterman, F.H. en C.L. Lekkerkerker (1995)** Mechanismen van kalkverrijking in het diepere grondwater in de Centrale Slenk (Noord-Brabant); in: *H₂O*, jrg 28, pag 42–49.
- Minnema, B., R.J. Stuurman en J.E. Vlot (1993)** Hydrologisch onderzoek naar de regeneratie mogelijkheden van grondwaterafhankelijke natuurwaarden in de Mortelen en het Veldersbosch; TNO rapport OS 92-53A.
- Moura, M.L. en S.B. Kroonenberg (1990)** Geochemistry of Quaternary fluvial and eolian sediments in the southeastern Netherlands; in: *Geologie en Mijnbouw*, jrg 69, pag 359–373.
- Nolte, A.J. (1996)** Hydrogeochemie van de Centrale en Roerdal Slenk en het optreden van diepe kwel; TNO rapport GG-R-96-90B.
- Overbeck, F. (1975)** Botanisch-geologische Moorkunde; Wachholtz, Neumünster.
- Pomper, A.B. (1988)** Hydrochemisch onderzoek in het zuidelijk Peelgebied, deel II; Projectgroep Zuidelijk Peelgebied 49, Nota 1867; Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.
- Pons, L.J. (1949)** De uiterwaarden van de Maas bij Batenburg; in: *Boor en Spade*, jrg III, pag 122–130.
- Pons, L.J. (1957)** De geologie, de bodemvorming en de waterstaatkundige ontwikkeling van het land van Maas en Waal en een gedeelte van het rijk van Nijmegen; proefschrift Landbouwhogeschool Wageningen.
- Projectteam Verdroging (1989)** Verdroging van natuur en landschap in Nederland: Beschrijving en analyse.
- Reading, H.G. (1996)** Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy; derde druk, Blackwell, Oxford.
- Rolf, H.L.M. (1989)** Verlaging van de grondwaterstanden in Nederland: Analyse periode 1950–1986.
- Runhaar, J., C.R. van Gool en C.L.G. Groen (1996)** Impact of hydrological changes on nature conservation areas in the Netherlands; in: *Biological Conservation*, jrg 76, pag 269–276.
- Staring, W. (1856)** De bodem van Nederland: De samenstelling en het ontstaan der gronden in Nederland; A.C. Kruseman, Haarlem.
- Stiboka (1965)** De bodem van Nederland. Toelichting bij de bodemkaart van Nederland, 1:200.000; Stiboka, Wageningen.
- Stiboka (1972)** De bodemkaart van Nederland 1: 50.000. Toelichting bij de kaartbladen 57 oost Valkenswaard en 58 west Roermond; Stiboka, Wageningen.
- Stuurman, R.J. (1993)** De kwetsbaarheid van regionale grondwatersystemen in de Centrale Slenk; TNO rapport OS 93-82A.

- Stuurman, R.J. (1995)** Consequenties van de doorwerking van de dalende diepe stijghoogte op de ondiepe stijghoogte in de Centrale Slenk; TNO rapport HY 95-979.
- Stuurman, R.J. (1996)** Numerical modelling of groundwater flow systems; a case study in the SE part of the Netherlands; in: G.B. Engelen en F.H. Kloosterman (1996) *Hydrological systems analysis: Methods and applications*; Water Science and Technology Library, deel 20, Kluwer academic publishers, Dordrecht.
- Stuurman, R.J. en P. Vermeulen (1996)** Grensoverschrijdende grondwaterstromen in de Centrale en Roerdal Slenk; in: *Spraakwater*, nr 4; periodiek van NITG-TNO (<http://www.nitg.tno.nl/news/spr43.html>).
- Stuurman, R.J., H. Runhaar, J.W. Foppen, R. de Waal (1998)** Ecohydrologische systeembeschrijving in het veengebied ten noorden van de Brabantse Wal; TNO/SC-DLO rapport NITG 98-77-B.
- Stuurman, R.J., J.L. van der Meij, A. Biesheuvel en U. Pakes (1990)** De grondwaterstromingsstelsels en de grondwatersamenstelling van de provincie Noord-Brabant; TNO rapport OS 90-26A.
- Stuurman, R.J., J.Ph.M. Witte, R. van der Meijden en C.L.M. Groen (1996)** Landelijke hydrologische systeemanalyse. Deelrapport 5. Deelgebied Noord-Brabant/Limburg. De regionale grondwaterstromingsstelsels rond het Kempisch Plateau, de Brabantse dekzandruggen en de Limburgse Maasterrassen; TNO rapport GG-R-96-66B.
- Verstegen, M.A.J.M. (1993)** Verdroogde natuurgebieden in Noord-Brabant: Verdrogingsknelpunten nader beschreven; Dienst WMV, Provincie Noord-Brabant.
- Verstegen, M.A.J.M. (1994)** Verdroogde natuurgebieden in Noord-Brabant: Nieuwe verdrogingsknelpunten nader beschreven; Dienst WMV, Provincie Noord-Brabant.
- Zagwijn, W.H. en C.J. van Staaldouin (1975)** Toelichting bij geologische overzichtskaarten van Nederland; Rijks Geologische Dienst, Haarlem.

