86702
1037I-IV

Aardwarmtewinning en grootschalige warmteopslag in tertiaire en kwartaire afzettingen

Rijks Geologische Dienst:
Drs. Th.H.M. van Doorn
Dra. C.I. Leyzers Vis
Drs. N.Salomons

Dienst Grondwaterverkenning TNO:
Drs. W. van Dalfsen
Dr. H. Speelman
Dr.ir.W. Zijl

Rijks Geologische Dienst

Haarlem, februari 1985 Rapport nr.85KAR 02 EX

86702

Rijks Geologische Dienst

Spaarne 17, Haarlem
Postbus 157, 2000 AD Haarlem
Telefoon: 023 - 31 93 62
Telex: 71105 GEOLD
Postrekening: 24931

Telefonisch bereikbaar
ma-vrij van 8.30 u - 12.30 u
en van 14.00 - 17.00 u
Correspondentie te richten
aan de directeur
zo nodig t.a.v.:

Rijks Geologische Dienst
district Oost
t.a.v. Drs. E.A. van de Meene
postbus 58
7240 AB LOCHEM

Onderwerp

Compilatierapport

Uw kenmerk	Uw brief	Ons kenmerk	Bijlage(n)	Haarlem,
		DD/CB-851199	1	25 maart 1985

In de afgelopen jaren heeft de Rijks Geologische Dienst, in samenwerking met Dienst Grondwaterverkenning TNO, een inventarisatie uitgevoerd van aquifers binnen het Tertiair en (Onder) Kwartair van Nederland die mogelijkheden lijken te bieden voor aardwarmtewinning dan wel opslag van energie middels warm water. Daarnaast werd een aantal model en systeemstudies uitgevoerd door DGV/TNO. Opdrachtgever was het voormalige Projectbureau Energieonderzoek (PBE), thans PEO, dat de onderzoeksopdracht verstrekte in het kader van het Nationaal Onderzoek Programma Aardwarmte I (NOA-I).

De RGD heeft, in samenwerking met DGV/TNO, het negental rapporten dat sinds 1980 verschenen is, gecompileerd. Het is mij een genoegen U dit compilatierapport namens de opdrachtgever aan te mogen bieden.

RIJKS GEOLOGISCHE DIENST
Het Hoofd van de Hoofdafd.
Diepe Ondergrond

Drs. Chr. Staudt

INHOUD Blz.

	LIJST VAN FIGUREN	III
	LIJST VAN BIJLAGEN	VI
	SAMENVATTING EN CONCLUSIES	VII
	SUMMARY AND CONCLUSIONS	XIII
	INLEIDING	1
	VERANTWOORDING	5
1.	AARDWARMTEWINNING EN GROOTSCHALIGE WARMTE-OPSLAG	7
1.1.	Energiebesparing en diversificatie door toepassing van aardwarmtewinning en warmte-opslag	7
1.2.	Systeembeschrijvingen van aardwarmtewinning en warmte-opslag	11
1.3.	Karakteristieke grootheden bij aardwarmtewinning en warmte-opslag	13
2.	STROMING EN WARMTE-OVERDRACHT	17
2.1.	Het ondergrondse temperatuurveld in Nederland	17
2.2.	Grondwater voor warmtetransport	22
2.3.	Dynamica van grondwaterstroming	30
2.4.	Modelstudies	31
2.5.	Putten en putverstoppingen	33
3.	ENERGIEBALANS	37
3.1.	Thermische en hydraulische factoren	37
3.2.	Rendementen en temperatuurniveau's	39
4.	TERTIAIRE EN KWARTAIRE RESERVOIRZANDEN	45
4.1.	Algemeen	45
4.2.	Geologische geschiedenis	45
4.3.	Karakterisering van reservoirzanden	62
4.4.	Beschrijving van de tertiaire en onder-kwartaire reservoirzanden	67
	4.4.1. Zand van Heers	67
	4.4.2. Basaal Zand van Dongen	69

		Blz.
	4.4.3. Zand van Brussel	71
	4.4.4. Complex van Kallo	73
	4.4.5. Zand van Berg	75
	4.4.6. Zand van Voort	79
	4.4.7. Formatie van Breda	81
	4.4.8. Formatie van Oosterhout	85
	4.4.9. Kiezeloöliet Formatie en Formatie van Scheemda	89
	4.4.10. Formatie van Maassluis	91
4.5.	Beschrijving van boven-kwartaire reservoirzanden	94
4.6.	Zoutgehalte van het in de reservoirzanden aanwezige grond-/formatiewater	99
4.7.	Toelichting op de bijlagen	101
	LITERATUURLIJST	105

LIJST VAN FIGUREN

		Blz.
Figuur A	Inventarisatie tertiaire en onder-kwartaire aquifers, mogelijk geschikt voor opslag/winning	XI
Figuur 1.1	Enkele toepassingsmogelijkheden voor grootschalige warmteopslag	8
Figuur 1.2	Jaarbelastingsduurkromme van warmtedistributiesystemen	9
Figuur 1.3	Principe van aardwarmtewinning	9
Figuur 1.4	Het principe van warmteopslag in ondergronds poreus en permeabel reservoir	10
Figuur 1.5	Karakteristieke grootheden aan de warmtewisselaar	10
Figuur 1.6	Eigenschappen van zoet water als functie van de temperatuur	12
Figuur 1.7	Minimum-diepten beneden maaiveld tot bovenkant reservoir en toelaatbare injectiedruk als functie van het temperatuurniveau	14
Figuur 2.1	Temperatuurprofielen in een grondwaterwaarnemingsput en in een diepboring	18
Figuur 2.2	Temperatuurverdeling op 25 m -mv	19
Figuur 2.3	Temperatuurverdeling op 100 m -mv	19
Figuur 2.4	Temperatuurverdeling op 250 m -mv	20
Figuur 2.5	Temperatuurverdeling op 500 m - NAP	20
Figuur 2.6	Temperatuurverdeling op 1000 m - NAP	21
Figuur 2.7	Temperatuurverdeling op 1500 m - NAP	21
Figuur 2.8	Relaties tussen karakteristieke grootheden bij aardwarmtewinning en warmte-opslag	24
Figuur 2.9	Het temperatuurverloop als functie van de tijd in de produktieput van een geothermisch doublet	26
Figuur 2.10	Schematisch overzicht van ondergrondse warmteverliezen	28
Figuur 2.11	Voorbeelden van put-configuraties	28
Figuur 2.12	Temperatuurverdeling in een gelaagd reservoirzand tijdens de accumulatiefase	32
Figuur 2.13	Temperatuurverdeling in een gelaagd reservoirzand tijdens en na de opslag- en onttrekkingsfase(n)	32

		Blz.
Figuur 3. 1	Terugwinningsfactoren bij de eerste en de vijfde cyclus bij opslag van warmte in een homogeen reservoir	40
Figuur 3. 2	Temperatuurverloop aan de hete put bij onttrekking van warmte tijdens de eerste en de vijfde opslagcyclus	41
Figuur 3. 3	Temperaturen en warmteverliezen in een reservoir	42
Figuur 3. 4	Temperatuur aan de hete put als functie van de geproduceerde hoeveelheid water	42
Figuur 4. 1	Stratigrafisch schema van de Onder, Midden en Boven Noordzee Groepen	46
Figuur 4. 2	Paleogeografie van het Tertiair van NW-Europa	48
Figuur 4. 3	Curve van zeespiegelbewegingen gedurende het Paleogeen in Nederland	48
Figuur 4. 4	Belangrijke structurele elementen gedurende Tertiair en Onder-Kwartair	50
Figuur 4. 5	Verbreiding van Formatie van Dongen	52
Figuur 4. 6	Isopachenkaart van het Boven-Krijt	54
Figuur 4. 7	Boven-Mioceen: isopachen- en faciësdistributiekaart; zones FC en Fi+Su	56
Figuur 4. 8	Evolutie van de kustlijn en fluviatiele sedimentatie in de zuidelijke Noordzee en aangrenzende gebieden vanaf het Boven-Mioceen tot het Midden-Pleistoceen	58
Figuur 4. 9	Positie van Nederland binnen het Zechsteinbekken	60
Figuur 4.10	Halokinese	60
Figuur 4.11	Gebruikte classificatie-tabellen en -diagrammen voor korrelgrootte en sortering	64
Figuur 4.12	Zand van Heers	66
Figuur 4.13	Basaal Zand van Dongen	68
Figuur 4.14	Zand van Brussel	72
Figuur 4.15	Complex van Kallo	74
Figuur 4.16	Zand van Berg en 'Zand' van Asse	76

		Blz.
Figuur 4.17	Zand van Voort	78
Figuur 4.18	Formatie van Breda	80
Figuur 4.19	Formatie van Oosterhout	86
Figuur 4.20	Formatie van Scheemda/Kiezeloöliet Formatie	88
Figuur 4.21	Formatie van Maassluis	92
Figuur 4.22	Verbreiding van de Formatie van Tegelen	96
Figuur 4.23	Verbreiding van de Formatie van Harderwijk	96
Figuur 4.24	Verbreiding van de Formatie van Kedichem	96
Figuur 4.25	Verbreiding van de Formatie van Enschede	96
Figuur 4.26	Verbreiding van de Formatie van Sterksel	98
Figuur 4.27	Verbreiding van de Formatie van Veghel	98
Figuur 4.28	Verbreiding van de Formatie van Urk	98
Figuur 4.29	Verbreiding van de Formatie van Kreftenheye	98
Figuur 4.30	Stratigrafisch schema van de Onder, Midden, en Boven Noordzee Groepen, waarin aangegeven de (seismisch) gekarteerde niveaus met bijlagenummer	102

LIJST VAN BIJLAGEN

Bijlage 1: Schematisch overzicht van tertiaire en onderkwartaire afzettingen
Bijlage 2: Lokatiekaart boringen
Bijlage 3: Lokatiekaart seismiek
Bijlage 4: Diepteligging basis Tertiair
Bijlage 5: Verbreiding Basaal Zand van Dongen
Bijlage 6: Diepteligging bovenkant Zand van Brussel
Bijlage 7: Diktekaart Zand van Brussel
Bijlage 8: Diepteligging basis Formatie van Rupel
Bijlage 9: Diepteligging basis Formatie van Breda
Bijlage 10: Verbreiding en diepteligging van zandige eenheden binnen Formatie van Breda
Bijlage 11: Dikte en diepteligging van Zandlichaam in Formatie van Oosterhout (Groningen), Zand van Voort (N.Brabant/Limburg)
Bijlage 12: Diepteligging basis Formatie van Maassluis
Bijlage 13: Diepteligging bovenkant Formatie van Maassluis
Bijlage 14: Diepte tot het diepste zoet-brak grensvlak
Bijlage 15: Profielen A-A' en B-B'
Bijlage 16: Profielen C-C' en D-D'
Bijlage 17: Legenda bij profielen

SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Tijdelijke opslag van warmte d.m.v. warm water in de ondergrond en winning van lage temperatuur aardwarmte uit het grondwater bieden in Nederland reële mogelijkheden van energiebesparing en energiewinning.

Onderzoek heeft plaatsgevonden in twee richtingen:

1. Theoretisch-hydrogeologisch onderzoek d.m.v. modelstudies naar eigenschappen en gedragskarakteristieken van watervoerende zandlichamen (aquifers), hoofdstuk 1 t/m 3.
   Deze modelstudies leveren enerzijds een inzicht in het gedrag van (warm) water binnen een aquifer, met inachtneming van variërende omstandigheden zoals diepteligging, permeabiliteit en porositeit, anderzijds geven zij aan waar technische problemen te verwachten zijn en hoe een proef- of demonstratieproject opgezet en begeleid zou dienen te worden.
2. Een geologisch-hydrogeologische inventarisatie van verbreiding, diepteligging, dikte en karakteristieke eigenschappen van eventueel bruikbare aquifers in het Tertiair en Kwartair van Nederland, hoofdstuk 4.
   De geologisch-hydrogeologische inventarisatie heeft geleid tot een beschrijving van de belangrijkste aquifers/geologische eenheden van tertiaire en kwartaire ouderdom voor wat betreft gesteente-, porositeits- en permeabiliteitsparameters. Tevens wordt een groot aantal kaarten, profielen en figuren gepresenteerd ter illustrering van de geologische opbouw en ontwikkeling van Nederland vanaf het begin van het Tertiair. Aan de hand hiervan kunnen vooral de economische haalbaarheid en optimale locatie van opslag- en/of winningsprojecten bepaald worden.

De in het rapport samengevatte studies zijn zeer sterk gericht op geologische en hydrogeologische aspecten van opslag- en winningsprojecten, niet op het beantwoorden van vragen als: economische haalbaarheid, uitvoerbaarheid, reële mogelijkheden, rentabiliteit e.d. Veel is afhankelijk van concrete eisen en doelstellingen, die van project tot project zullen verschillen.

In zeer algemene termen kan gesteld worden dat zowel winnings- als opslagprojecten in Nederland voor wat betreft de geologische en hydrogeologische condities zeer goed uitvoerbaar zullen zijn; zie Fig. A. De haalbaarheid neemt toe naarmate de aquifers geologisch jonger zijn, aangezien dit onder de Nederlandse omstandigheden vrijwel altijd betekent dat er minder klei in de aquifer aanwezig is en er minder compactie is opgetreden dan bij oudere afzettingen. Bovendien geldt voor de meeste aquifers dat de porositeit en vooral de permeabiliteit toeneemt naar de oostelijke en zuidelijke verbreidingsgrens, de oorspronkelijke kustzone van de afzettingsbekkens.

Voor winning van lage temperatuur-aardwarmte op beperkte diepte (0-100 m) lijken er op vrijwel iedere plaats in Nederland hydrogeologisch gesproken mogelijkheden aanwezig te zijn en zijn het met name de technische beperkingen c.q. mogelijkheden van warmtepompen die de (economische) haalbaarheid van een project zullen bepalen.

Voor winning van lage temperatuur-aardwarmte op diepten tussen 100 en 500 m is gezien de ongunstige verhouding van project(lees: boor-)kosten en de geringe toename van de winbare hoeveelheid warmte vermoedelijk slechts een beperkt aantal lokaties geschikt, zoals bijvoorbeeld de zeer zandige afzettingen in het noordoosten van de provincie Limburg.

Winning van lage temperatuur aardwarmte op diepten tussen 500 en 1500 m behoort wat betreft de (hydro)geologische condities, in verschillende regio's in Nederland tot de mogelijkheden. Warmtewinning uit pre-tertiaire lagen, die soms meer permeabel zijn, zal lokaal de voorkeur verdienen boven winning uit diepgelegen tertiaire afzettingen. Indien diepe winning overwogen wordt binnen het Tertiair, lijken de beste mogelijkheden aanwezig te zijn in het zuiden des lands.

Tijdelijke opslag van warmte is in principe mogelijk in de ondergrond van vrijwel geheel Nederland, waarmee niet gezegd is dat in geheel Nederland financieel rendabele projecten mogelijk zijn.

De meerderheid van de gekarteerde zandlichamen die voor opslag geschikt zijn, liggen voldoende diep om opslagtemperaturen van 100 °C en meer toe te staan. Afhankelijk van het te injecteren volume warm water (per tijdseenheid) zal van plaats tot plaats een afweging dienen te geschieden welke aquifer de voorkeur verdient, waarbij factoren als de verblijftijd per opslagcyclus, de injectiedruk e.d. een rol zullen moeten spelen in de overwegingen.

De geologisch jongste, gekarteerde formatie, de Formatie van Maassluis, biedt in zijn gehele verbreidingsgebied het meest uitgebreide scala van mogelijkheden. Als bezwaar tegen opslag in deze formatie kan de lokaal hoge permeabiliteit aangemerkt worden, hetgeen het warmteverlies groot kan maken bij langdurige opslag. In geologisch oudere en in dieper gelegen aquifers zal door grotere diepteligging en de aldaar veelal lagere permeabiliteit een toename van projectkosten optreden.

Voor wat betreft de dieper gelegen afzettingen lijkt in noordelijk Nederland, naast opslag in de Formatie van Maassluis, opslag in zanden van de Formatie van Oosterhout tot de weinige reële mogelijkheden te behoren voor grootschalige seizoensopslag. Boven-kwartaire afzettingen kunnen lokaal in aanmerking komen voor lage temperatuur warmte-opslag.

In het oosten van Nederland en zeer grote delen van de provincies Zeeland, Noord-Brabant en Limburg lijken (zeer) vele aquifers zich voor opslag te kunnen lenen en zijn het vraag en aanbod van respectievelijk afnemer en producent van restwarmte die de keuze van de meest geschikte aquifer zullen bepalen. Overigens zijn de in het kader van dit onderzoek verkregen resultaten van een dusdanig globaal karakter, dat uitsluitend algemene conclusies kunnen worden getrokken. Voortgezet onderzoek door uitvoering van onder meer een landelijk boorprogramma is noodzakelijk voor een meer betrouwbare en gedetailleerde bepaling van de mogelijkheden voor lage temperatuur-aardwarmtewinning en -warmte-opslag in Nederland.

Zonder een dergelijk aanvullend onderzoeksprogramma is het in alle gevallen zonder meer noodzakelijk bij ieder (warmte-opslag) project proefboringen te laten verrichten, ten einde vast te kunnen stellen of de lokatie geschikt is.

SUMMARY AND CONCLUSIONS

In the Netherlands the saving and production of energy are possible. Underground reservoirs can be used for the temporary storage of warm water and the extraction of low enthalpy geothermal energy.

Research has been carried out in two directions:

1. Theoretical hydrogeological research.
   Modelling studies have been used to determine the properties and behavioural characteristics of water bearing sand bodies (aquifers); see chapters 1-3.
   These modelling studies have resulted primarily in providing an insight into the state of warm water in an aquifer as regards to varying conditions such as depth, porosity and permeability; secondly they provide a view of the type of technical problems that can be expected, and how a pilot or demonstration scheme can be designed and controlled.

2. Geological hydraulic inventory.
   This inventory concerns the extent, depth, thickness and the characteristic properties of the prime aquifers which are thought suitable in the Tertiary and Quaternary deposits of the Netherlands subsurface; see chapter 4. 4.
   The inventory has resulted in a description of the most important aquifers and geological units of the Tertiary and Quaternary aged deposits concerning the nature of the rocks, porosity and permeability characteristics related to their geological and hydrogeological properties. The report contains a large number of maps, profiles and figures to illustrate the geological build up and development of the Netherlands sedimentary sequence since the beginning of Tertiary times. These can be used to determine the economic possibilities of location choice for the storage or production of energy from the subsurface.

The report has been oriented to the geological and hydrogeological aspects influencing the storage and productive properties of the

projects by bringing together the various studies, rather than to provide an answer to questions such as economic viability, practicability, actual possibilities, and the profitability. Much is dependent on the concrete requirements and aims, which vary from project to project. As far as the geological and hydrogeological aspects are concerned, it can be stated in very general terms that not only the production but also the storage of energy in the Netherlands subsurface is feasible; see fig. A. The achievability improves when aquifers are contained in the younger sediments. As a general rule, this is because of the reduction of the clay content and less compaction of the deposits in the shallow sediments of the Netherlands subsurface. The deeper sediments are more compacted by the overburden. It has also been brought out that most aquifers have better porosity and, what is more important, highly improved permeability in the direction of propagation borders in the East and South, the original coastal zones of the sedimentary basins.

From a hydrogeological point of view low enthalpy geothermal energy in the near surface (0-100 m) is seen to be possible over the entire Netherlands landmass. Only the technical restrictions, such as the heat pumps and the complete technical configuration of the production installation, may be a limitation to the viability of any project.

For low enthalpy geothermal energy at the intermediate level (100-500 m) there is an unfavourable relationship between the drilling costs and the small increase in production capacity of energy. Probably there are only a few suitable locations; for example, the more sandy sediments in the north-east of the Province of Limburg.

As far as the (hydro)geological conditions are considered, low enthalpy geothermal energy at the deeper levels (500-1500 m) is seen to be possible in different regions of the Netherlands. Energy production from the pre-Tertiary formations that have occasionally good porosity and permeability characteristics are in some cases to be preferred to the deeper Tertiary deposits. If consideration is given to the deeper horizons in the Tertiary then the south of the Netherlands should be the prime target.

Temporary subsurface storage of heat is in principle possible throughout almost the whole of the Netherlands, but this is not to say that profitable schemes are possible throughout the country.
The majority of the mapped sand bodies that are suitable for the storage of energy are at sufficient depth to withstand temperatures higher than 200 °C. The selection of sites depends on the quantity of warm water to be injected per unit time, since this is related to which aquifers that can be used for this purpose, to the length of the storage cycle and to the pressure of injection.
The youngest geological unit, the Formation of Maassluis, offers the best possibility over its entire depositional area. An objection to using this formation is the high local permeability which would enhance the loss of heat during an extended period of storage.
In the geologically older and deeper lying aquifers the project costs will increase due to the lower permeability at greater depths. As far as the deeper lying aquifers in the north of the Netherlands are concerned, the formation favoured in addition to the Maassluis is the Oosterhout, which offers the opportunity for large scale seasonal storage. Upper Quaternary formations are also locally suitable for low enthalpy heat storage.
In the east of the country and in a large part of the provinces of Zeeland, North-Brabant and Limburg many aquifers are seen to be suitable for storage of energy. Only supply and demand considerations will decide the outcome.
It should be noted that the results obtained from the above presented investigations are of a global character and, hence, only general conclusions can be made. Continuation of the investigations by carrying out a national drilling programme is a necessity to arrive at a more trustworthy and more detailed determination of the possiblities for low enthalpy heat production and subsurface storage in the Netherlands. Without such a supplementary research programme, the drilling of test wells in the region selected for heat storage or production of geothermal energy is necessary to determine the suitability of the site.

INLEIDING

Het voorliggende rapport is de compilatie van de resultaten van onderzoek dat gedurende een periode van ongeveer 5 jaar is uitgevoerd door de Rijks Geologische Dienst en de Dienst Grondwaterverkenning TNO; het rapport is een samenvatting van een negental meer gedetailleerde onderzoeksrapporten.

Het rapport wil een handzaam overzicht geven van mogelijkheden en problemen ten aanzien van met name:

1) tijdelijke opslag van warmte middels warm water in de Nederlandse ondergrond.
2) winning van lage enthalpie aardwarmte uit de Nederlandse ondergrond.

Het onderzoek vloeide voort uit het beschouwen van energiepolitiek zoals dat in het laatste decennium in Nederland en Europa plaatsvond. Naast de "klassieke" energieleveranciers als olie, gas, steenkool, waterkracht en nucleaire centrales werden nieuwe energiebronnen in ogenschouw genomen zoals zonne- en windenergie en het geothermisch potentieel van de ondergrond. Voorts werd energiebesparing een belangrijke doelstelling van het officiële regeringsbeleid. Er ontstond een Gespreksgroep Aardwarmte (GAW) die later tot de Begeleidingscommissie Aardwarmte (BCAW) zou leiden. Hierin zaten medewerkers van technische en natuurwetenschappelijke onderzoeksinstituten, het bedrijfsleven, Rijksdiensten en van het Ministerie van Economische Zaken.
Een voorstel voor een meersporenonderzoeksprogramma werd geaccepteerd door de minister van EZ waardoor gelden beschikbaar werden gesteld voor o.a. onderzoek naar het totale geothermische potentieel van de Nederlandse ondergrond, onderzoek naar winning en/of opslag van warm water in ondiep gelegen (0-1000 m) zandlichamen in de Nederlandse ondergrond en fundamenteel onderzoek d.m.v. model- en systeemstudies. Als sturende en begeleidende intermediair werd het Projectbureau Energieonderzoek PBE-TNO (thans PEO) opgericht.

Voor wat betreft de twee laatstgenoemde onderdelen werd een onderzoeksopdracht geformuleerd door PBE-TNO. De Rijks Geologische Dienst te Haarlem werd verzocht, in samenwerking met de Dienst Grondwaterverkenning TNO, een inventarisatie te maken van zandlichamen in de

ondergrond, waaruit lage temperatuur aardwarmte gewonnen kan worden of waarin tijdelijke opslag van warmte plaats kan vinden. DGV-TNO werd verzocht onderzoek te doen naar gedrag en eigenschappen van water in zandlichamen in de ondergrond bij regelmatige opwarming, afkoeling en, al dan niet kunstmatig opgewekte, stroming.

Het onderzoek van de Rijks Geologische Dienst werd eind 1980 begonnen en heeft geleid tot drie deelrapporten: Zuid-Nederland (Leyzers Vis RGD, 1982 en Schoute DGV-TNO, 1982), Midden-Nederland (Leyzers Vis RGD, Speelman DGV-TNO, 1983) en Noord-Nederland (Van Doorn RGD, Speelman DGV-TNO, 1984).
Deze rapporten bevatten o.a. hoofdstukken gewijd aan de geologische karakteristieken en de hydrogeologie van de, eventueel bruikbare, zandlichamen. Bovendien zijn een groot aantal niveaukaarten bijgesloten waarop diepteligging en verbreiding van meerdere, zandlichamen bevattende, eenheden is aangegeven. Door combineren van kaarten en bijgeleverde profielen (dwarsdoorsneden) is de totale opbouw van de ondergrond goed voorstelbaar. Verder wordt een inzicht gegeven in de geologische ontstaansgeschiedenis van Nederland sinds het begin van het Tertiair (ca. 64 miljoen jaar geleden).
Een compilatierapport waarin alle bestaande en in het kader van het geothermisch onderzoek verkregen porositeits- en permeabiliteitsgegevens betreffende het Tertiair en Onder-Kwartair van Nederland zijn opgenomen, is recentelijk uitgebracht (Breunese RGD, Speelman DGV-TNO, 1985).
Het fundamenteel-theoretisch onderzoek heeft een aantal rapporten opgeleverd waarin aan de hand van modellen o.a. getoond wordt hoe warmwaterlichamen zich in de tijd gedragen binnen een zandlichaam, waar verliezen optreden bij het opslaan van grote hoeveelheden warm water in de ondergrond en wat de injectie- en onttrekkingsproblematiek is bij opslag- en winningsprojecten.
Dit resulteerde in rapporten betreffende thermisch en hydraulisch gedrag van opslagsystemen en heet water (Van Dalfsen DGV-TNO, 1982), een ontwerp voor een warmteopslagsysteem (Speelman DGV-TNO, 1983) en een rapport betreffende warmteopslag op basis van simulatietechnieken (Van Dalfsen, DGV-TNO, 1984).

De hoofdstukken 1, 2 en 3 van dit eindrapport geven in het kort de resultaten van de model- en systeemstudies weer terwijl het hoofd-

stuk 4 de geologische-hydrogeologische deelrapporten samenvat. De bijlagen die het rapport vergezellen zijn verkleiningen van bijlagen uit de deelrapporten, die ten dele in de eindfase van het project bijgewerkt zijn.

In verband met de belangen van de industrie (olie, gas en andere delfstoffen) en de momenteel vigerende wetgeving op het gebied van de winning van delfstoffen werden de pre-tertiaire afzettingen in een meer globale zin geïnventariseerd in het eerder genoemde onderzoek naar het geothermisch potentieel van de diepe ondergrond.

VERANTWOORDING

Het voorliggende rapport is ontstaan dankzij de samenwerking van een grote groep personen en instanties.
Gegevens werden geput uit de archieven van de Rijks Geologische Dienst, de Dienst Grondwaterverkenning TNO en het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne (v.h. RID).
Een groot deel van deze gegevens is echter afkomstig van oliemaatschappijen en de zoutindustrie.
De samenstellers willen dan ook hun erkentelijkheid tot uitdrukking brengen aan:
AKZO, AMOCO, BP, CHEVRON, CONOCO, DSM, FINA, GULF, MOBIL, NAM, Noordelijke Zoutwinning, PETROLAND, PHILLIPS en PLACID.

In een langlopend project zijn inzet en flexibiliteit belangrijke voorwaarden voor het bereiken van goede resultaten.
De samenstellers danken voor deze inzet en getoonde flexibiliteit: Tineke Snoep-Kilian en Eric v.d. Most van Geologic BV voor de geofysische ondersteuning; Ron Kramer en Peter de Groot van de RGD voor het vele werk als archiefmedewerkers verricht voor dit project; Joop Houkes, André Koers, Han Bruinenberg en Ewald van der Eng, allen tekenaar bij de RGD; de fotografen Alphons Karstens en John van Delft; de lichtdrukkers Jan Klijn, Petra Gräper en Freek Dolieslager; de collationist J.B.M. Langbein; Licia Hendriks-de Lange (RGD), Irene Hiert en Grace van Dullemen (DGV-TNO) de secretaresses en typiste die in de afgelopen jaren de vele (deel)rapporten, modelstudies en compilaties uitgetypt hebben.
Verder danken wij al die collega's en medewerkers van RGD en DGV-TNO die voor korte of langere tijd aan geologisch, geofysisch of hydrogeologisch onderzoek meegewerkt hebben.

Dit compilatierapport is gebaseerd op de navolgende rapporten:

W. van Dalfsen,
Het thermisch en hydraulisch gedrag van een opslagsysteem met heet water in het Brussels Zand onder Breda volgens eenvoudige modellen.
Dienst Grondwaterverkenning TNO, Delft (feb. 1982), rapportnr. OS 82-04.

* W. van Dalfsen,
Het thermohydraulisch gedrag van heet water in een poreus ondergronds opslagreservoir.
Dienst Grondwaterverkenning TNO, Delft (nov. 1982), rapportnr. OS 82-23

* W. van Dalfsen,
Tijdelijke warmte-opslag in ondergrondse watervoerende lagen.
Dienst Grondwaterverkenning TNO, Delft (aug. 1984), rapportnr. OS 84-21

* Th.H.M. van Doorn en H. Speelman,
Geologische en hydrogeologische inventarisatie van tertiaire en onder-kwartiaire afzettingen in Noord-Nederland t.b.v. ondergrondse opslag van warm water.
Rijks Geologische Dienst, Haarlem (1984), rapportnr. 84KAR08EX.

* C.I. Leyzers Vis,
Geologische inventarisatie van tertiaire afzettingen in Zuid-Nederland ten behoeve van ondergrondse opslag en winning van warmte.
Rijks Geologische Dienst, Haarlem (1982), rapportnr. 820S22.

* C.I. Leyzers Vis en H. Speelman,
Geologische en hydrogeologische inventarisatie van tertiaire en onder-kwartiare afzettingen in Midden-Nederland t.b.v. ondergrondse opslag en winning van warm water.
Rijks Geologische Dienst, Haarlem (1983), rapportnr. 83KA20EX.

* H.R. Schoute,
Hydrogeologische inventarisatie van tertiaire aquifers in Zuid-Nederland ten behoeve van ondergrondse opslag van warm water.
Dienst Grondwaterverkenning TNO, Delft (1982), rapportnr. OS 82-22.

* H. Speelman,
Ontwerp van een systeem voor warmte-opslag in een ondergronds poreus en permeabel reservoir.
Dienst Grondwaterverkenning TNO, Delft (1983), rapportnr. OS 83-03.

* H. Speelman en J.N. Breunese,
Permeabiliteit, porositeit en kleigehalte van tertiaire en onderkwartaire afzettingen in Nederland.
Rijks Geologische Dienst, Haarlem (1985), rapportnr. 84KAR13EX.

1. AARDWARMTEWINNING EN GROOTSCHALIGE WARMTE-OPSLAG

1.1 Energiebesparing en diversificatie door toepassing van aardwarmtewinning en warmte-opslag

Fossiele brandstoffen zijn de gangmakers van de huidige beschaving. Analyses van de wereld-energiesituatie aan het eind van de jaren '60, de oliecrises in 1973 en 1979, en aantasting van het natuurlijk milieu hebben het belang aangetoond van besparing op het gebruik van deze energiedragers.

In geïndustrialiseerde gebieden met een gematigd of subarctisch klimaat is aanzienlijke besparing van brandstoffen zoals olie en gas mogelijk door:

- aardwarmtewinning, ofwel geothermische exploitatie;
- gebruik van restwarmte, o.a. van krachtcentrales, vuilverbrandingsinstallaties en de procesindustrie.

Aardwarmtewinning zoals in Nederland toegepast zou kunnen worden is het onttrekken van warmte aan water dat zich in poreuze watervoerende lagen (aquifers) in de ondergrond bevindt. Aardwarmte wordt veelal gerangschikt onder de duurzame energiebronnen.

Nuttig gebruik van zomerse restwarmte is doorgaans niet te verwezenlijken zonder opslag hiervan, tot het koude jaargetijde ("stookseizoen") is aangebroken. Een grootschalig, kunstmatig warmtereservoir bovengronds, of aan de oppervlakte, is economisch niet haalbaar door de hoge prijs voor materiaal, constructie en isolatie daarvan. In plaats van kunstmatige warmtereservoirs komen ondergrondse permeabele watervoerende lagen in aanmerking voor seizoen-opslag van warmte. Enkele toepassingsmogelijkheden voor grootschalige warmte-opslag zijn weergegeven in Fig. 1.1.

Figuur 1.2 geeft de jaarbelastingsduurkromme van een warmtedistributiesysteem weer. Het oppervlak onder de gestreepte lijn geeft de door basislast geleverde warmte gedurende een zekere tijd per jaar aan (b.v. warmte als basislast geleverd door een warmte/kracht installatie), en het oppervlak onder de getrokken lijn stelt de warmtevraag van het warmtedistributiesysteem over een zeker aantal uren per jaar voor. Het warmtetekort dat niet door de basislast

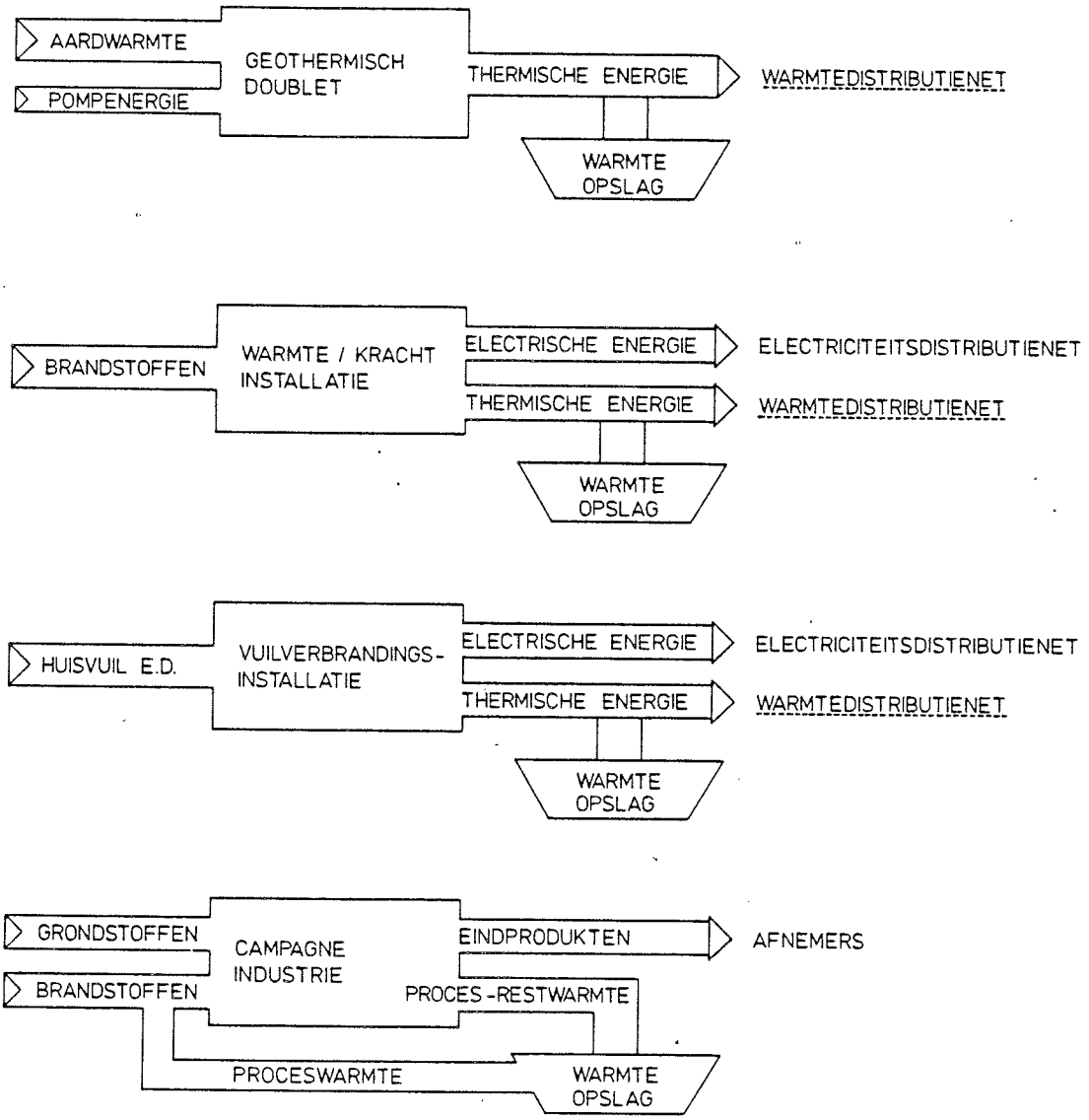


Fig. 1.1 Enkele toepassingsmogelijkheden voor grootschalige warmteopslag

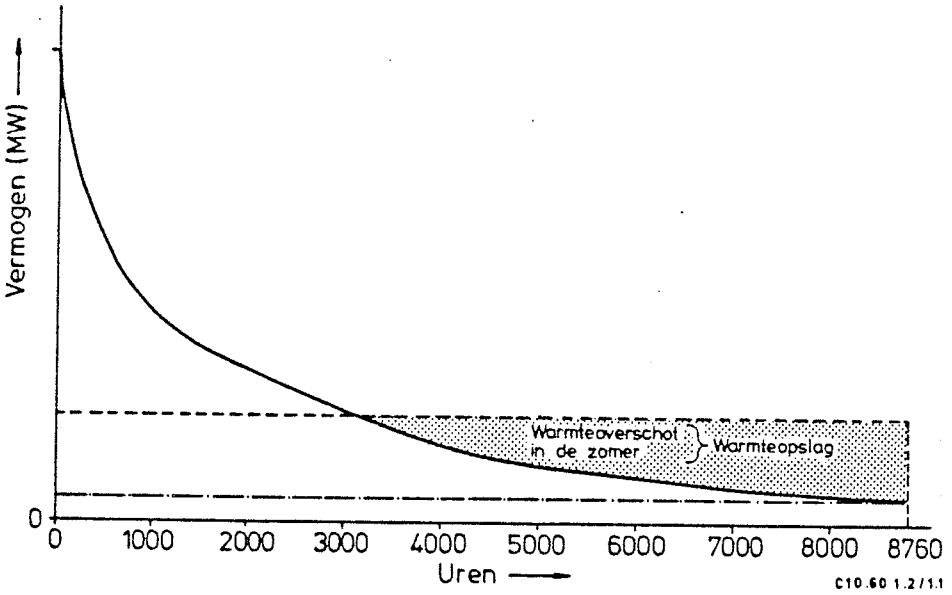


Fig. 1.2 Jaarbelastingsduurkromme van warmtedistributiesystemen

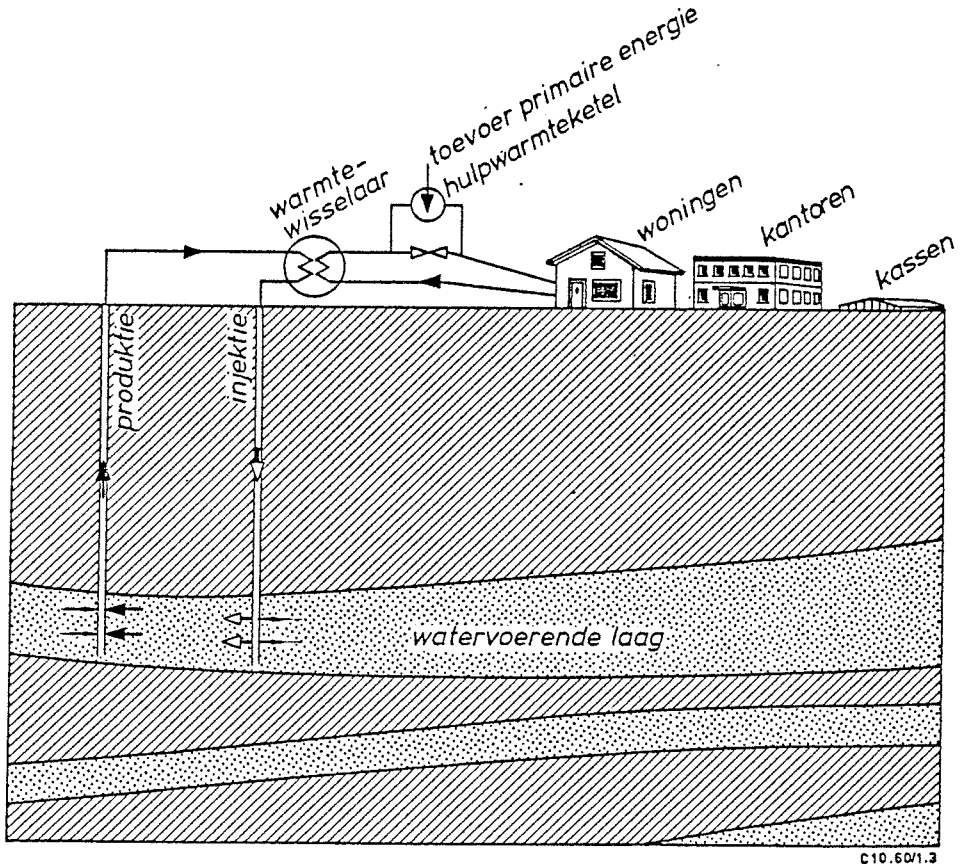
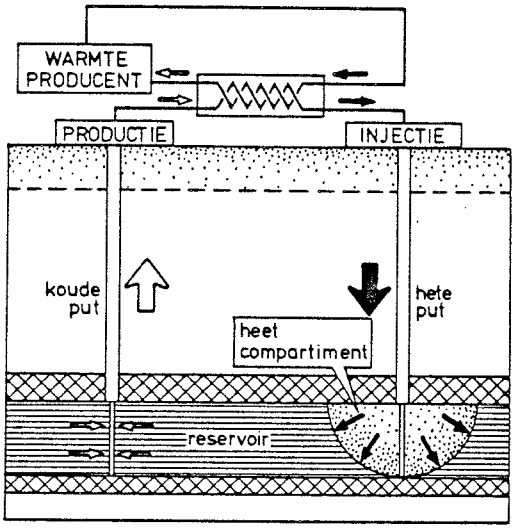
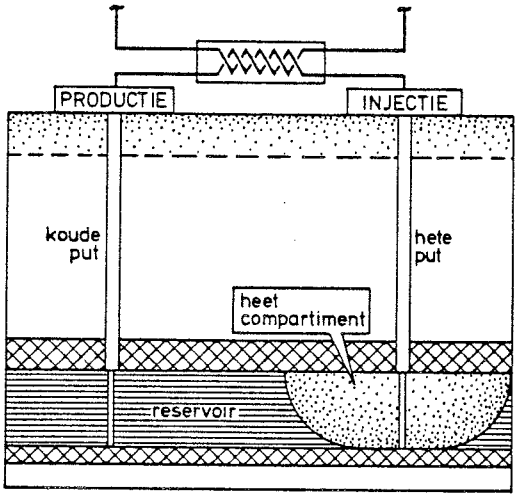


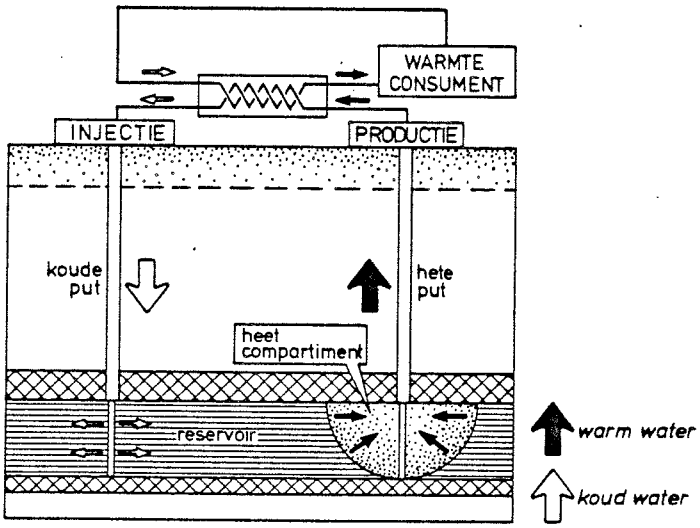
Fig. 1.3 Principe van aardwarmtewinning



Accumulatie van warmte in het reservoir

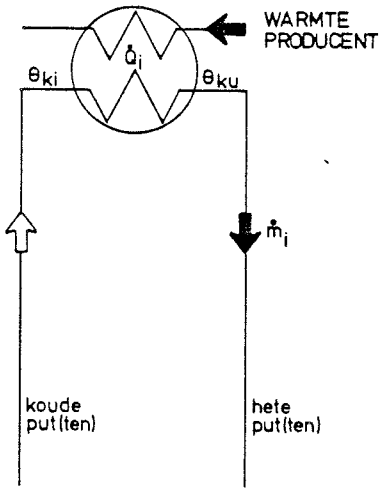


Opslag van warmte in het reservoir

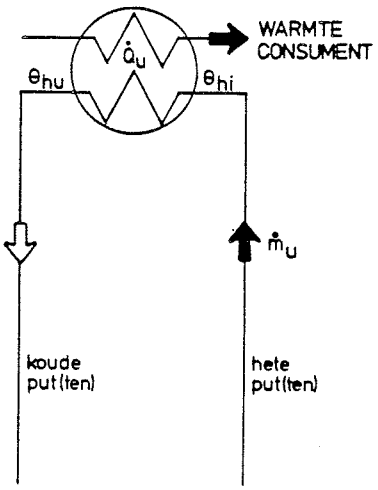


Onttrekking van warmte uit het reservoir

Fig. 1.4 Het principe van warmteopslag in ondergronds poreus en permeabel reservoir



Accumulatiefase



Ontrekkingsfase

Fig. 1.5 Karakteristieke grootheden aan de warmtewisselaar

C10.80/1.4

wordt geleverd wordt opgewekt door hulpwarmte-eenheden bij te schakelen; het warmte-overschot dat in de zomer wordt geproduceerd, kan ondergronds worden opgeslagen en worden gebruikt voor het opvangen van de pieklast in de winter.

1.2 Systeembeschrijvingen van aardwarmtewinning en warmte-opslag

Het principe van aardwarmtewinning is in Fig. 1.3 weergegeven. Het formatiewater, ook wel genoemd het grondwater, wordt door middel van één of meer geboorde productieputten uit een aquifer opgepompt, door een warmtewisselaar geleid, en vervolgens met een verlaagde temperatuur door één of meer injectieputten weer in dezelfde aquifer geïnjecteerd. Bij twee putten, zoals in Fig. 1.3, spreekt men van een doublet.
De onttrokken warmte wordt door middel van een warmwater transportsysteem (distributienet) naar de gebruiker gebracht.
Indien de temperatuur van het formatiewater niet hoger is dan 120 °C spreekt men van lage temperatuur of lage enthalpie geothermie.

In Fig. 1.4 is schematisch een opslagsysteem met gebruik van een aquifer als warmtereservoir weergegeven in drie verschillende fasen van bedrijf.
Tijdens een warmtebergingsfase, ofwel accumulatiefase, wordt in de warmtewisselaar restwarmte overgedragen aan water uit de aquifer. Het in de warmtewisselaar opgewarmde water wordt geïnjecteerd in de aquifer; hier ontstaat dan feitelijk een uitdijend heet compartiment in de ondergrond: het reservoir. Omdat het hete water koudere gesteentekorrels in zijn weg opwarmt, dijt het hete compartiment minder ver uit dan het injectiewaterlichaam.
Afhankelijk van het gekozen opslagbeleid (seizoenopslag versus kortdurende opslagcycli) kunnen periodes optreden waarin warmte noch geïnjecteerd noch onttrokken wordt. Dat wil zeggen dat een stabiele opslagfase ingetreden is.
Tijdens een warmte-onttrekkingsfase stroomt het water in omgekeerde richting, zodat het hete compartiment ineenschrompelt. Uit het reservoir wordt heet water geproduceerd, dat in de warmtewisselaar warmte overdraagt aan water in een warmte-distributienet. Het afgekoelde water uit de warmtewisselaar wordt via de putten in de omtrek van het warmtereservoir weer in de ondergrond gebracht.

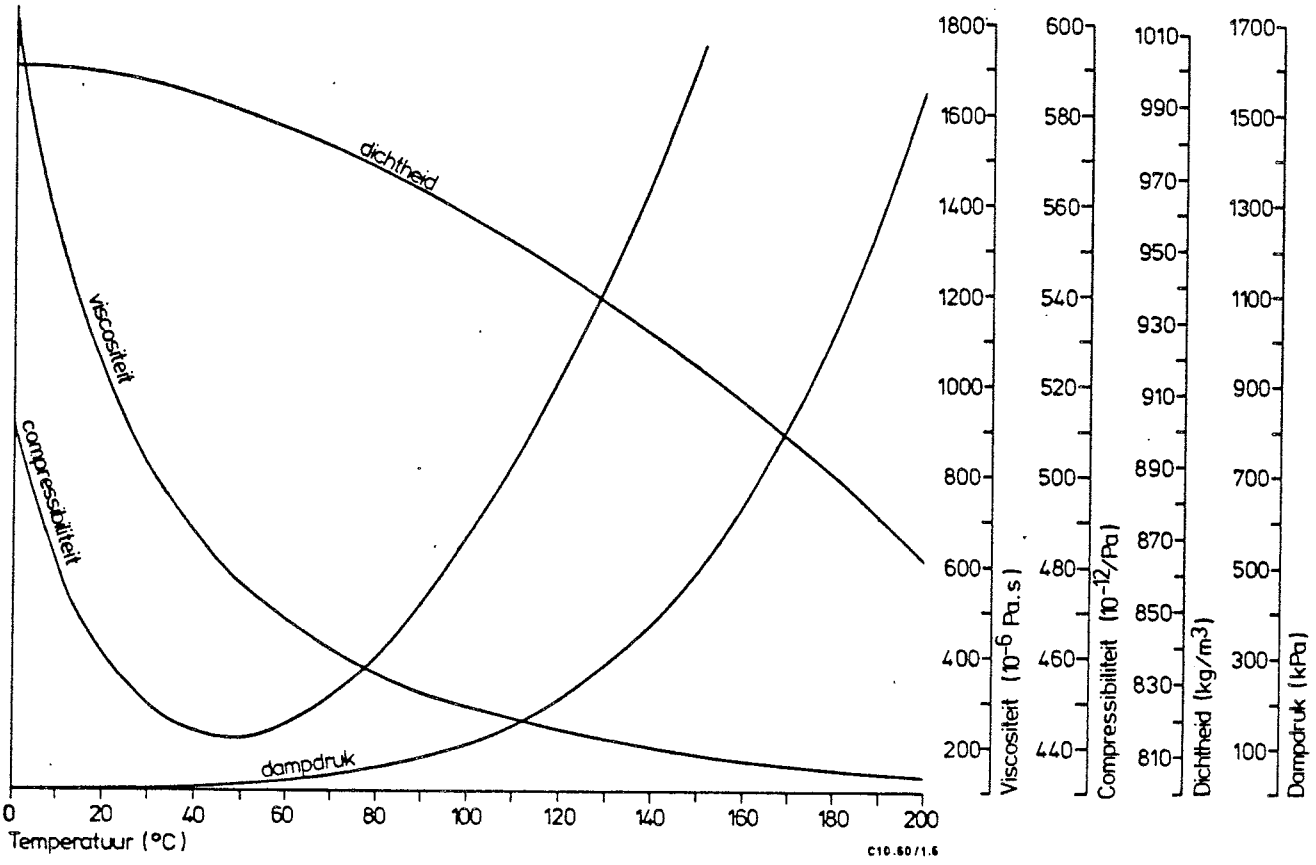


Fig. 1.6 Eigenschappen van zoet water als functie van de temperatuur

1.3 Karakteristieke grootheden bij aardwarmtewinning en warmte-opslag

Het proces van aardwarmtewinning en van warmte-opslag wordt gekenmerkt door de warmtestromen Q_i en Q_u (Watt), die via de warmtewisselaar in en uit het opslagsysteem komen; zie Fig. 1.5.
Deze warmtestromen zijn evenredig met de massastromen m_i en m_u (gekoppeld met de volumestromen) van het formatiewater in de watervoerende laag of lagen; zie sectie 2.2.
Bij aardwarmtewinning speelt alleen onttrekking, en geen berging, van heet water een rol; de daarbij behorende massastroom m_u (kg/s) is weergegeven in het onderste schema van Fig. 1.5. Bij warmte-opslag is er ook een warmtebergingsfase met bijbehorende massastroom m_i; zie bovenste schema van Fig. 1.5.
In overeenstemming met Van Dalfsen (1984, p.7) worden de temperaturen Θ (°C) op de verschillende punten in het systeem onderscheiden door gebruik van de indices k (=koud) of h (=heet) naar gelang het water uit de koude of hete put(ten) komt, en van de indices i (=in) of u (=uit) waarmee de temperaturen voor, respectievelijk achter de warmtewisselaar aangegeven worden; zie Fig. 1.5 (zie ook uitleg symbolen in sectie 2.2).

Inherent aan het proces van aardwarmtewinning uit en warmte-opslag in ondergrondse watervoerende lagen is de stroming van water daarin. Deze stroming ondervindt weerstand en moet daarom gaande worden gehouden met pompen. De hydraulische weerstand van een aardwarmtewinnings- en een opslagsysteem is in twee componenten te splitsen: enerzijds het bovengrondse deel: de weerstand van warmtewisselaars en leidingen; anderzijds het ondergrondse deel: de putten en de aquifer, waarin stroming plaatsvindt. De eerste component dient kunstmatig tot een aanvaardbare waarde beperkt te worden door genoemde onderdelen van het opslagsysteem passend te dimensioneren. De tweede component hangt af van de dikte van het warmtereservoir, de verdeling van de intrinsieke permeabiliteit daarin (een natuurlijk gegeven), de temperatuurverdeling in het reservoir, de puttenconfiguratie, de weerstand bij de overgang van put naar reservoir en de verdeling van de totale waterstroom over de putten. Bij gegeven temperatuur geeft het ondergrondse permeabiliteitsveld plaatsgewijs aan hoeveel weerstand het poriënstelsel biedt aan stroming van een vloeistof.

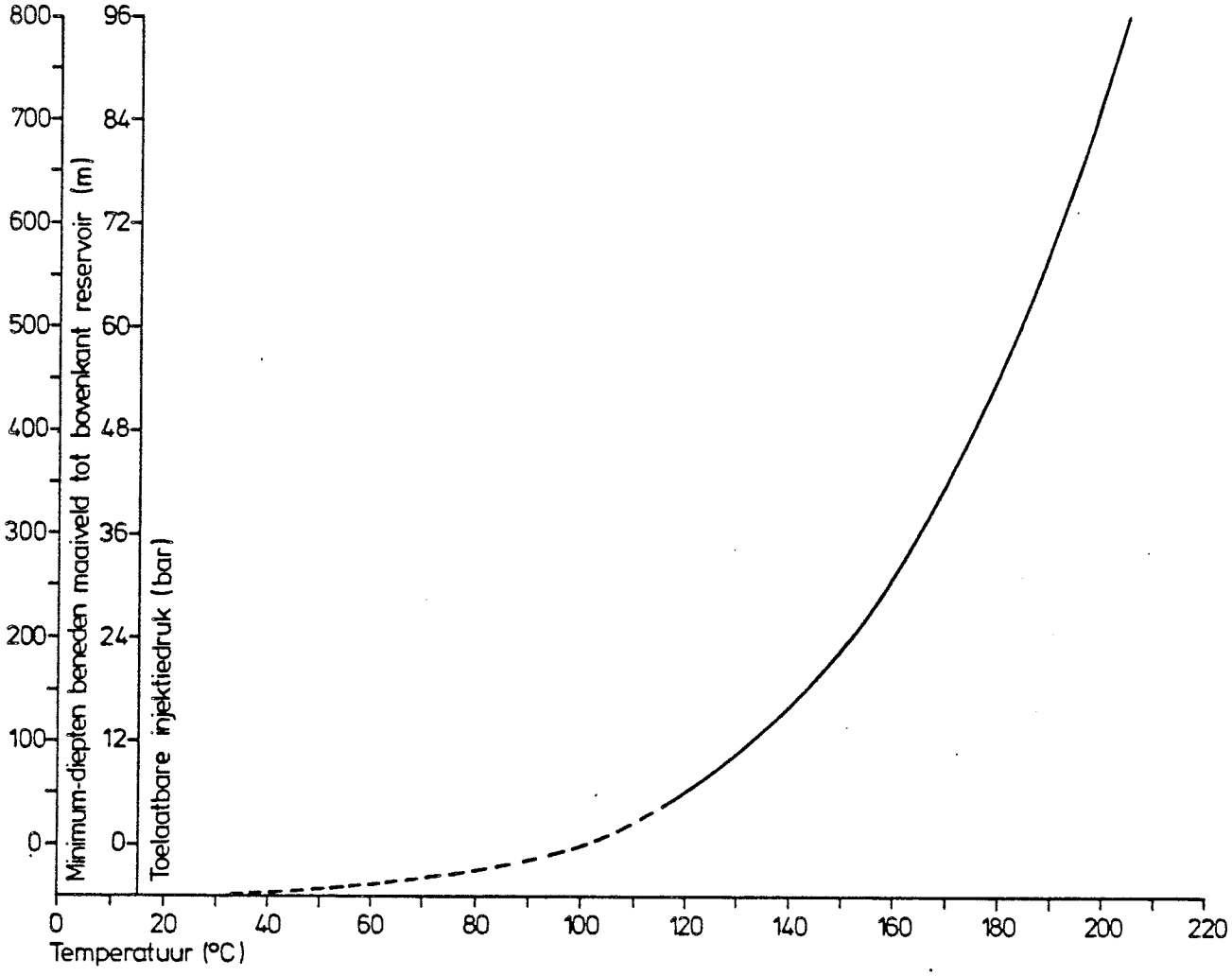


Fig. 1.7 Minimum-diepten beneden maaiveld tot bovenkant reservoir en toelaatbare injectiedruk als functie van het temperatuurniveau

C10.60/1.7

Het temperatuurveld bepaalt plaatsgewijs de interne wrijving in het stromende water, uitgedrukt in zijn viscositeit; zie Fig. 1.6. Als gevolg van de viscositeitstoename bij temperatuurafname in een reservoir, neemt de ondergrondse hydraulische weerstand toe gedurende de warmtewinning. Gedurende warmteberging (alleen bij een warmte-opslagsysteem) neemt, door temperatuurtoename, de ondergrondse hydraulische weerstand af.

Het warmtetransportmedium, het formatiewater, moet ten minste in de aquifer en het liefst in iedere component van het opslagsysteem in vloeibare vorm worden gehouden. Stoomvorming in de aquifer dient te worden vermeden, onder meer omdat stoom een veel groter opslagvolume nodig heeft. Bij injectie van water moet derhalve in de aquifer een druk worden gehandhaafd die hoger ligt dan de verzadigingsdruk van water bij de betreffende injectietemperatuur. In Fig. 1.6 zijn de drukken in het temperatuurinterval van 0 °C tot 200 °C weergegeven. We zien hieruit dat water met een temperatuur van minder dan 100 °C vloeibaar is onder atmosferische druk ($\cong$1bar= 100kPa=10^5Pa). Bij deze temperatuur kan dus in aquifers op iedere diepte worden geaccumuleerd. Bij 150 °C, respectievelijk 180 °C, is sprake van de vloeibare fase als een druk wordt gehandhaafd van ca. 500 kPa, respectievelijk ca. 1000 kPa. Dit betekent dat in principe in een reservoir met hydrostatische druk en een diepteligging van de bovenkant op ca. 40 m reeds water van 150 °C kan worden geïnjecteerd, en vanaf ca. 90 m water van 180 °C. (De atmosferische druk van 100 kPa = 1 bar komt overeen met de druk van een waterkolom van ca. 10 m hoogte). Onttrekking van de geïnjecteerde warmte in de vorm van heet water is bij die hoge druk natuurlijk onpraktisch. Deze theoretische waarden vormen een ondergrens voor de toelaatbare diepte en uit veiligheidsoverwegingen wordt voorgesteld om onder de Nederlandse omstandigheden een veiligheidsmarge van een factor 5 ten opzichte van de theoretische minimum-waarden te hanteren (Speelman, p.33). In Fig. 1.7 is, uitgaande van genoemde veiligheidmarges, de relatie weergegeven tussen diepte bovenkant reservoir, toelaatbaar geachte injectiedrukken t.o.v. atmosferische druk en temperatuurniveau van het te accumuleren water. Op diepten van meer dan ca. 300 m kan de gehanteerde veiligheidsnorm overigens worden vervangen door

een minder stringente, omdat de gemiddelde dichtheid van zowel gesteente als formatiewater met de diepte toeneemt. Op diepten van meer dan 300 m kan dan worden uitgegaan van een viermaal hogere druk dan de verzadigingsdruk bij gegeven temperatuur en een daarbij behorende viermaal zo grote diepte.

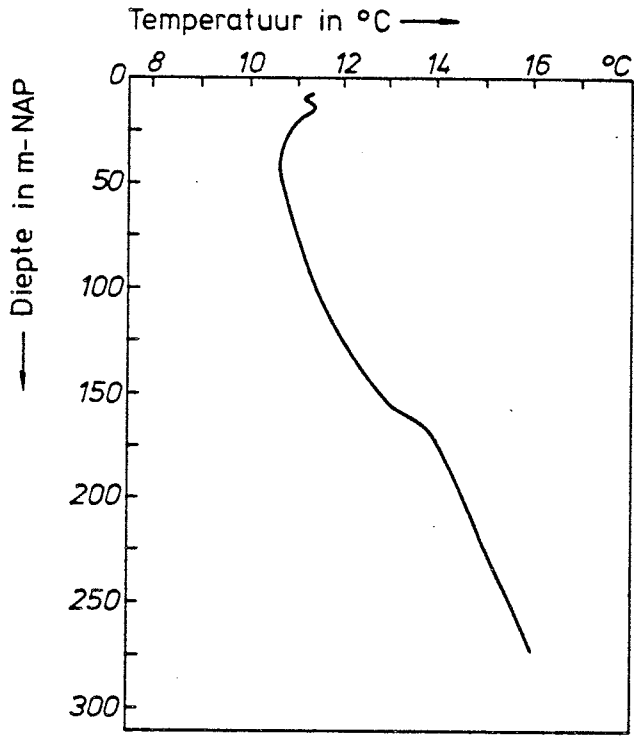
In de fase van onttrekking van warmte in de vorm van heet water aan het reservoir wordt een drukdaling geïnduceerd door de afpomping, hetgeen in principe tot stoomvorming kan leiden. Indien echter wordt uitgegaan van de in Fig. 1.7 vermelde minimumdiepten voor reservoirs, zal dit in de praktijk geen problemen opleveren.

2. STROMING EN WARMTE-OVERDRACHT

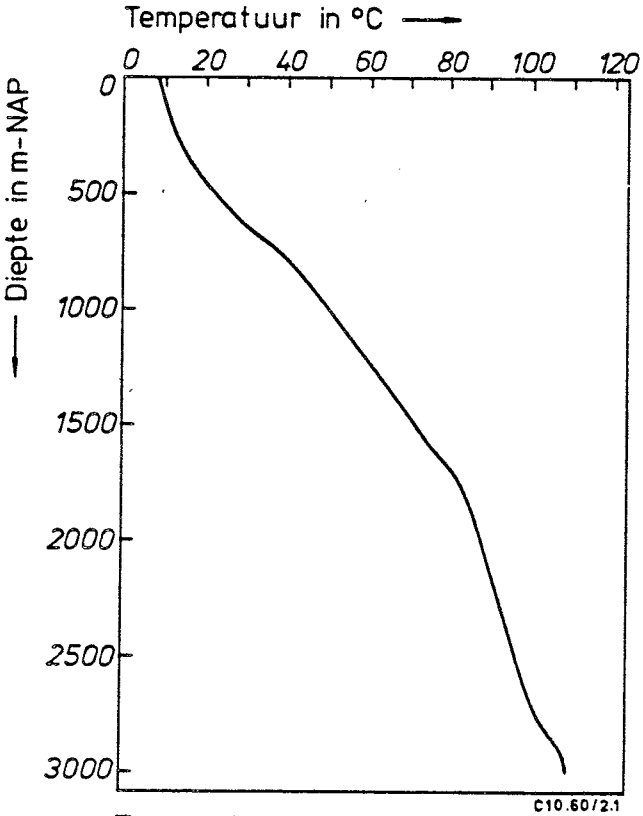
2.1 Het ondergrondse temperatuurveld in Nederland

Het ondergrondse temperatuurveld in Nederland wordt weergegeven middels zes isothermenkaarten op dieptes van 25, 100, 250, 500, 1000 en 1500 m -NAP. Deze isothermenkaarten zijn gebaseerd op temperatuurmetingen in grondwaterwaarnemingsputten en diepboringen; zie fig. 2.1.
Deze niveaus werden geselecteerd op grond van hun relevantie voor lage enthalpie-aardwarmtewinning op beperkte diepte (0-100 m) en de combinatie van winning en opslag tussen 100 m en de basis van het Tertiair, die plaatselijk op een diepte van meer dan 1500 m ligt.
De eerste drie kaarten (fig. 2.2, 2.3, 2.4) zijn overgenomen uit een publikatie van Van Dalfsen (DGV-TNO 1983), de laatste drie (fig. 2.5, 2.6, 2.7) uit een rapport van de Rijks Geologische Dienst (rapport nr. 84KAR16EX 1984).

De warmte, zoals aanwezig in het bovenste deel van de aardkorst, is afkomstig uit twee verschillende bronnen, te weten: ingestraalde energie van buiten de aarde en warmte afkomstig uit de aarde zelf.
Bij de eerstgenoemde bron moet voornamelijk aan zonne-energie gedacht worden, die dank zij het warmte-absorberende vermogen van de bodem ingevangen wordt. Door grondwaterstroming treedt advectief warmtetransport op, hetgeen ten dele het ondiepe temperatuurveld bepaalt.
Een groot deel van de warmte in de ondergrond komt uit de aarde zelf. Voor een zeer belangrijk deel gaat het om warmte die vrijkomt bij het verval van de natuurlijke, radioactieve elementen, zoals die in de aardkorst voorkomen. Hierbij moet vooral gedacht worden aan de radioactieve isotopen Uranium 238, Uranium 235, Thorium 232 en Kalium 40. Een, vermoedelijk beperkter, deel van de warmte die uit de aarde zelf komt is warmte die uit de mantel en eventueel de kern van de aarde via convectiestromen aan de aardkorst overgedragen wordt. In het licht van de theorieën over plaattectoniek en -beweging moet de grootste overdracht van warmte aan de aardkorst verwacht worden in gebieden van actieve spreiding (riftzones zoals bijv. IJsland en Oost-Afrika) of in gebieden van subductie, waar de hieraan gerelateerde vulkanische bogen zich ontwikkelen (bijv. Indonesië).



Temperatuurprofiel in de grondwater-waarnemingsput 57E-81, d.d. 9-6-'82.



Temperatuurverloop in een diepboring in Nederland

Fig. 2.1 Temperatuurprofielen in een grondwaterwaarnemingsput en in een diepboring

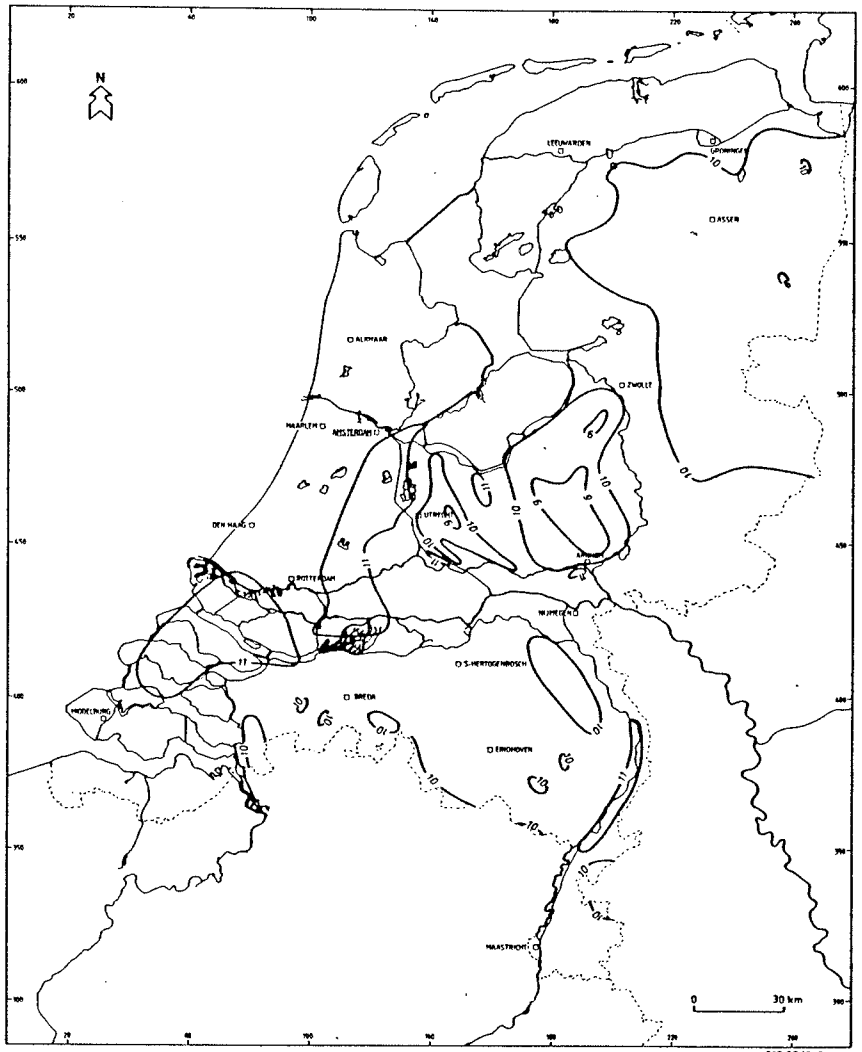


Fig 2-2 Temperatuurverdeling op 25m-mv (naar Van Dalfsen, 1983)

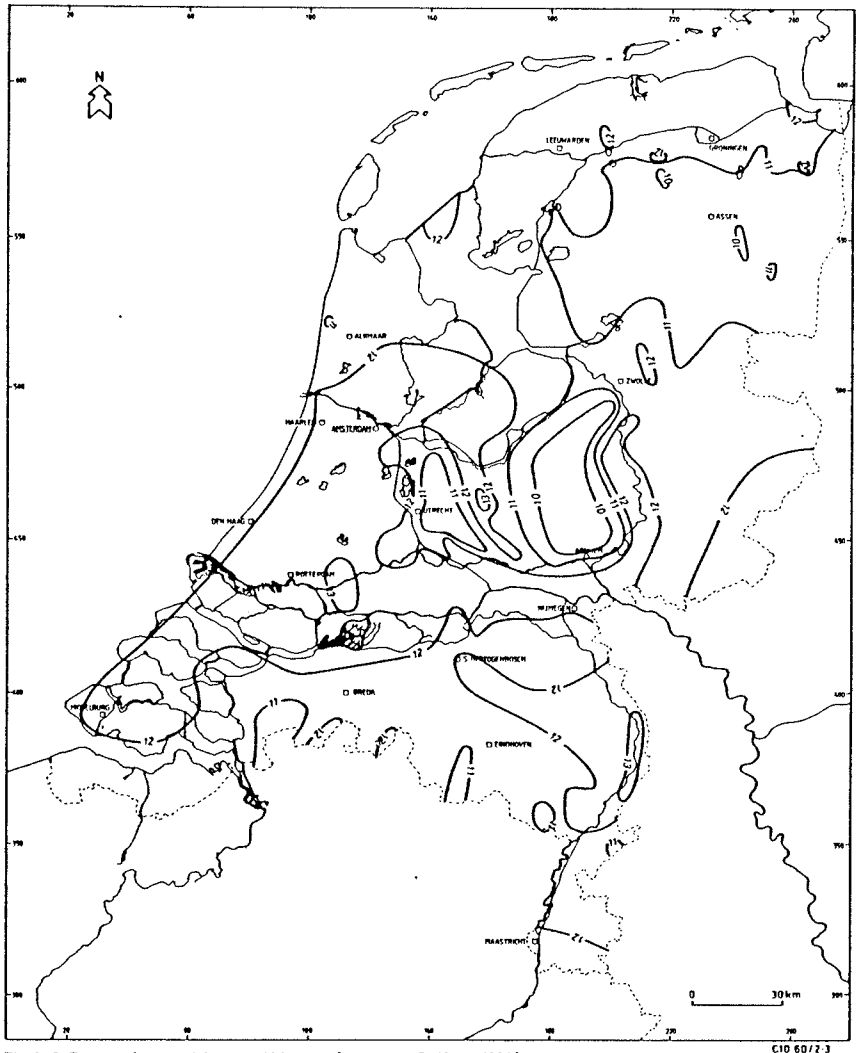


Fig. 2-3 Temperatuurverdeling op 100m-mv (naar Van Dalfsen, 1983)

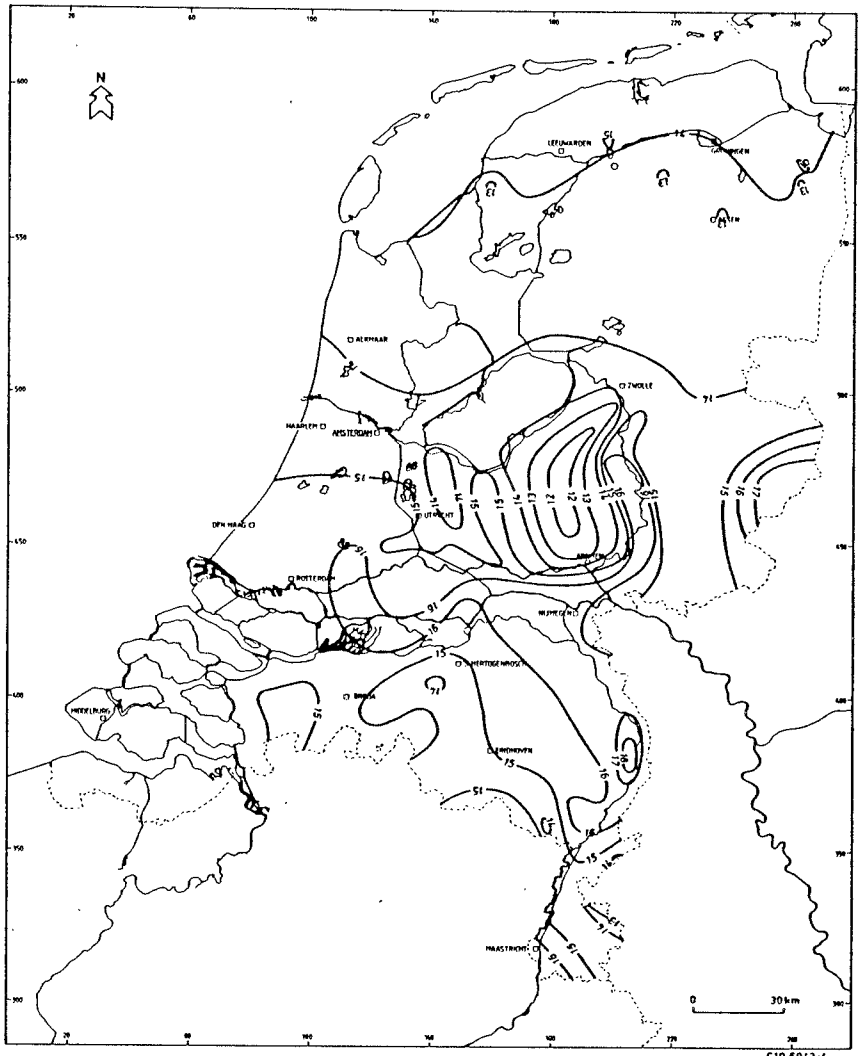


Fig. 2-4 Temperatuurverdeling op 250 m-mv (naar Van Dalfsen, 1983)

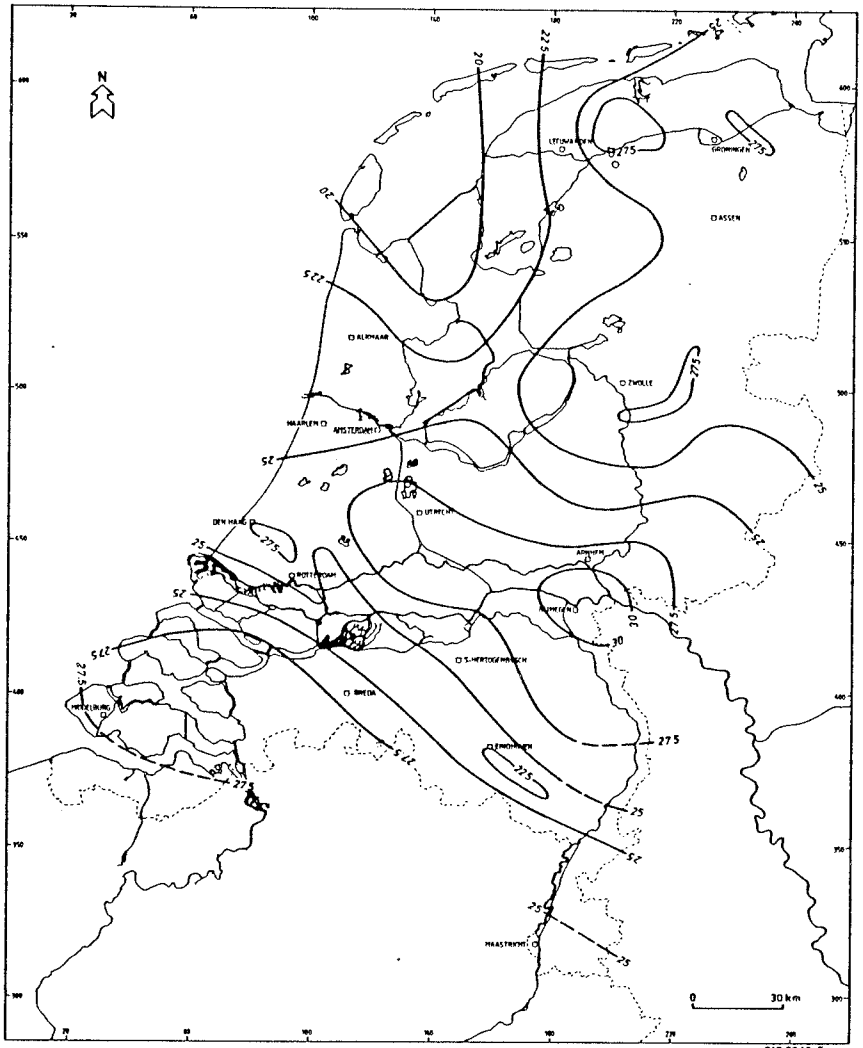


Fig. 2-5 Temperatuurverdeling op 500 m-N.A.P. (naar Prins et al, 1984)

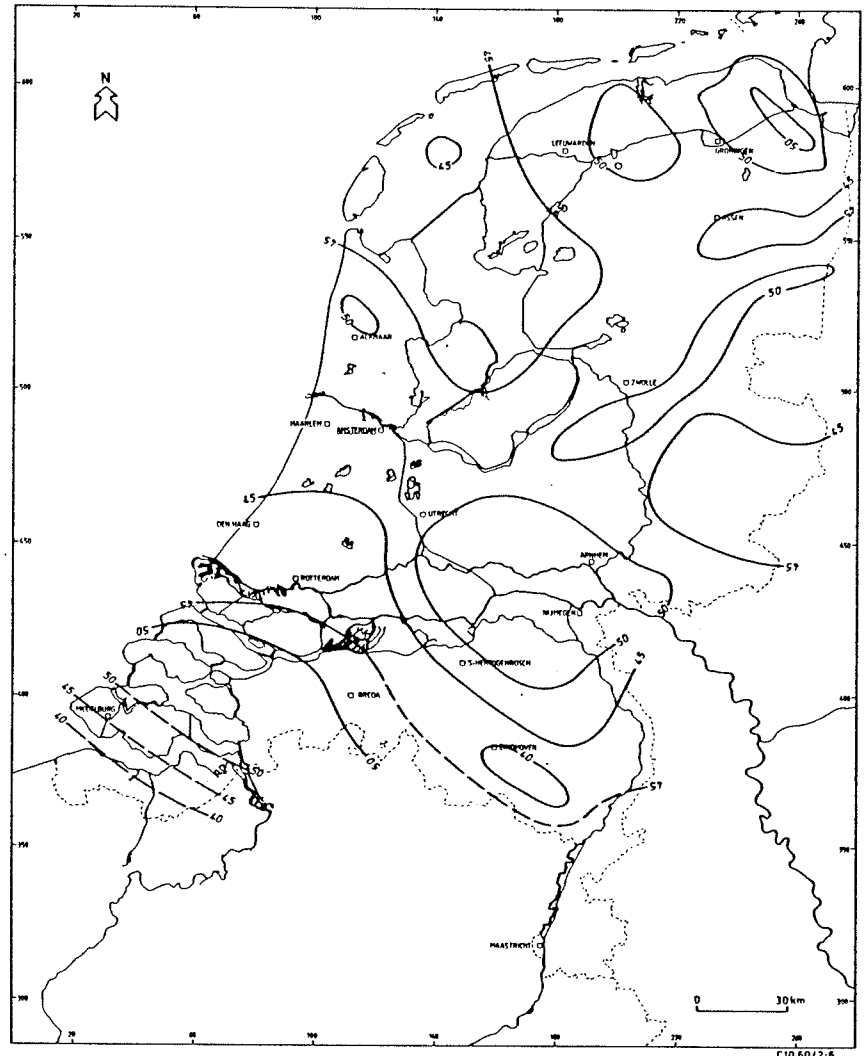


Fig. 2-6 Temperatuurverdeling op 1000m-N.A.P. (naar Prins et al, 1984)

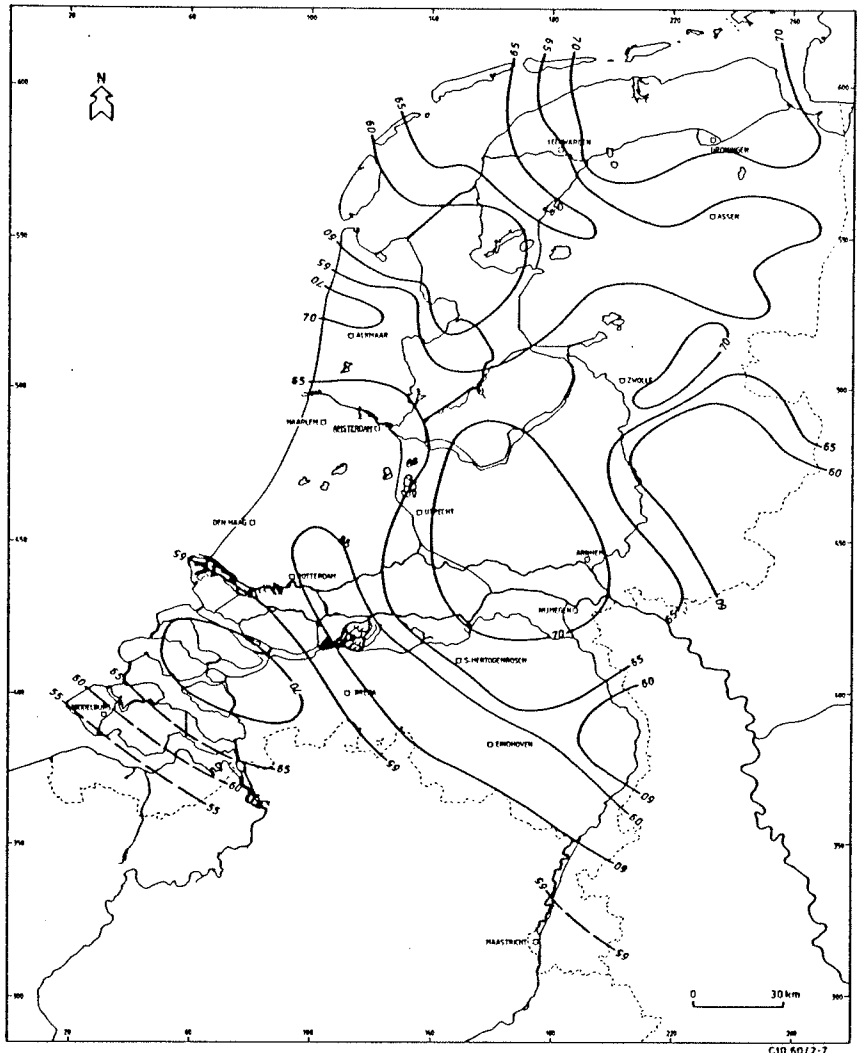


Fig. 2-7 Temperatuurverdeling op 1500m-N.A.P. (naar Prins et al, 1984)

In Nederland lijkt alleen de voortzetting van de Rijndal Graben, de Centrale Slenk, tot een niet doorgezet riftsysteem te behoren waar sprake zou kunnen zijn van warmte-overdracht vanuit de mantel.
Op de kaarten waar de temperatuurverdeling in de EEG op verschillende diepten wordt weergegeven valt dit effect goed waar te nemen in de Rijndal Graben. De in dit rapport gepubliceerde kaarten laten een dergelijk effect in de Centrale Slenk niet zien. Dit vindt zijn oorsprong in het feit dat deze depressie opgevuld is met geologisch gesproken jonge, grove en dus weinig geconsolideerde, hoogpermeabele afzettingen, die diepe penetratie van relatief koud meteorisch water toestaan.
Op de verschillende kaarten zijn een aantal anomalieën (plaatsen waar de gemeten waarde afwijkt van het algemene beeld) herkenbaar.
In gebieden waar de geologisch gesproken oudere gesteenten (bijv. het Carboon) dicht aan het oppervlak voorkomen worden relatief hoge temperaturen waargenomen, bijvoorbeeld in het zuiden des lands tegen het Londen-Brabant massief.
De relatief lage temperaturen op de Veluwe en de Utrechtse heuvelrug zijn verklaarbaar door advectief koude-transport van meteorisch water dat hier infiltreert en opgenomen wordt in de hydrologische kringloop.
Anomalieën in het noordoosten van Nederland, zoals die op sommige isothermenkaarten herkenbaar zijn, kunnen verklaard worden door de "schoorsteen"-werking van zoutpijlers in de ondergrond. Zout heeft een hoog warmtegeleidingsvermogen, waardoor rond de top van zoutpijlers de temperatuur relatief hoog is, terwijl deze aan de basis ervan juist relatief laag is.
De anomalie in de westelijke Waddenzee lijkt te wijten aan de aanwezigheid van een oude vulkaan, dus gesteente met een hoog warmtegeleidingsvermogen, in de diepe ondergrond.

2.2 Grondwater voor warmtetransport

In sectie 1.3. zijn reeds de warmtestromen, de massastromen, de volumestromen en de temperaturen geïntroduceerd. Het verband tussen deze grootheden is eenvoudig voor te stellen met de volgende betrekkingen die geldig zijn aan de warmtewisselaar:

$$\dot{Q}_i = c\,\dot{m}_i\,(\Theta_{ku} - \Theta_{ki}) \qquad (2.2.1)$$

$$\dot{Q}_u = c\,\dot{m}_u\,(\Theta_{hi} - \Theta_{hu}) \qquad (2.2.2)$$

Hierin is:

c	soortelijke warmte van water bij constante druk	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$\dot{m}_i$	massastroom van in het reservoir gepompte water	$kg.s^{-1}$
$\dot{m}_u$	massastroom van uit het reservoir geproduceerde water	$kg.s^{-1}$
$\dot{Q}_i$	warmtestroom van naar het reservoir gepompte water	W
$\dot{Q}_u$	warmtestroom van uit het reservoir geproduceerde water	W
Θ_{hi}	temperatuur van water uit hete put dat de warmtewisselaar ingaat (productiefase)	°C
Θ_{hu}	temperatuur van water uit hete put dat na warmteafgifte de warmtewisselaar uitgaat (productiefase)	°C
Θ_{ki}	temperatuur van water uit koude put dat de warmtewisselaar ingaat	°C
Θ_{ku}	temperatuur van water uit koude put dat na opwarming de warmtewisselaar uitgaat	°C

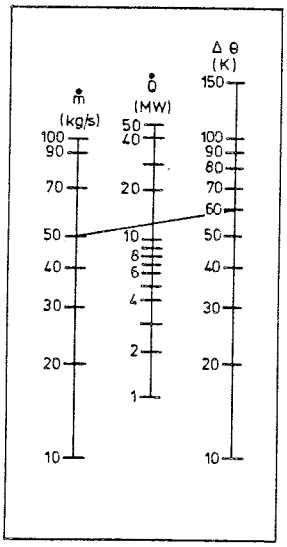
De volumestroom $\dot{V}$ ($m^3.s^{-1}$) is gerelateerd aan de in bovenstaande formules gebruikte massastroom m volgens

$$\dot{V} = \dot{m}/\rho \qquad (2.2.3)$$

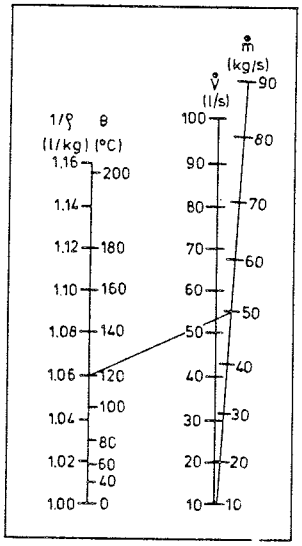
waarin ρ (kg/m^3) de dichtheid van het water bij temperatuur Θ voorstelt. In Fig. 2.8 geeft het eerste nomogram formules 2.2.1, 2.2.2 weer met c = 4,2 kJ. kg^{-1}. K^{-1} (dit is de soortelijke warmte van water). Het tweede nomogram geeft formule 2.2.3 weer voor water bij een temperatuur Θ; hierin is $1/\rho$ het soortelijk volume (m^3/kg).

Voor de totale hoeveelheid warmte Q_i (Joule), die gedurende een bergingsfase van tijdsduur t_i (sec) in het reservoir is gebracht, geldt de betrekking:

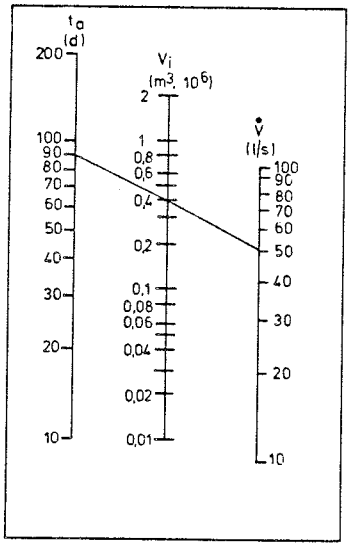
$$Q_i = \int_0^{t_i} \dot{Q}_i \, dt \qquad (2.2.4)$$



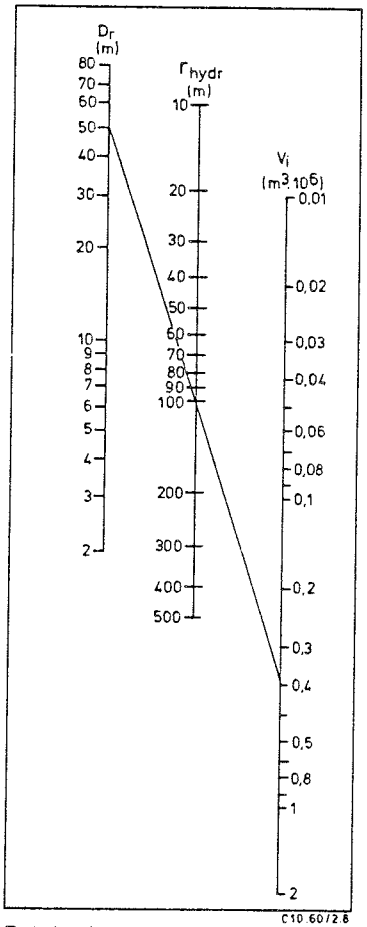
Relaties tussen:
massastroom..... ṁ
temperatuurverschil Δθ
en warmtestroom..... Q̇



Relaties tussen:
soortelijk volume 1/ϱ
en temperatuur ..... θ
volumestroom ..... V̇
en massastroom ..... ṁ



Relaties tussen
volumestroom..... V̇
accumulatieduur..... ta
en geaccumuleerd volume.... Vi



Relatie tussen geaccumuleerd volume V_i, reservoirdikte D_r en gemiddelde afstand van de injectieput tot het hydraulisch front r_{hydr}
Gebaseerd op: $V_i = \pi (r_{hydr})^2 D_r \Phi$
waarin Φ = effectieve porositeit met een aangenomen waarde van 0,25

Fig. 2.8 Relaties tussen karakteristieke grootheden bij aardwarmtewinning en warmteopslag.

Voor de warmtestroom $\dot{Q}_u$ (Watt) en de totale hoeveelheid warmte Q_u (Joule), die gedurende een onttrekkingsfase van tijdsduur t_u (sec) aan het warmtereservoir onttrokken wordt, geldt analoog de volgende betrekking:

$$Q_u = \int_0^{t_u} \dot{Q}_u \, dt \qquad (2.2.5)$$

De verhouding $\eta = Q_u/Q_i$ wordt het opslagrendement, of ook wel de nuttige terugwinningsfactor genoemd voor een zekere cyclus van het opslagsysteem; zie Van Dalfsen (1984, p.8). Dit opslagrendement mag niet verward worden met de terugwinningsfactor, die gedefiniëerd is als de verhouding tussen geïnjecteerde warmte en warmte die wordt teruggewonnen uit dezelfde massa water als geïnjecteerd. Opgemerkt zij dat het opslagrendement i.h.a. lager is dan de terugwinningsfactor (Van Dalfsen, nov. 1982, p.25), zie ook sectie 3.2.
Het derde nomogram van Fig. 2-8 geeft het analogon voor formule 2.2.4 weer, niet voor $\dot{Q}_i$, Q_i, maar voor de volumestromen en volumes $\dot{V}_i$, V_i.

Bij een zekere dikte D_r en een porositeit ϕ van het reservoir behoort bij een zeker opgeslagen volume water V_i een zekere afstand van de injectieput tot het hydraulisch front r_{hydr}. Indien we aannemen dat het volume van de opgeslagen massa water cilindervormig rond de put is geldt als verband tussen deze grootheden:

$$V_i = \pi (r_{hydr})^2 D_r \phi \qquad (2.2.6)$$

Het vierde nomogram van Fig. 2.8 geeft het verband tussen deze grootheden bij een gemiddelde effectieve porositeit $\phi = 0{,}25$.

Omdat het water warmte afstaat aan het gesteente blijft het warmtefront achter bij het hydraulisch front; zie sectie 1.2. Aan de ene zijde van dit warmtefront heerst de temperatuur van het hete water bij injectie; aan de andere zijde is de temperatuur nog niet door ondergronds getransporteerde warmte toegenomen. De vertraging van het warmtefront ten opzicht van het injectiewaterfront wordt

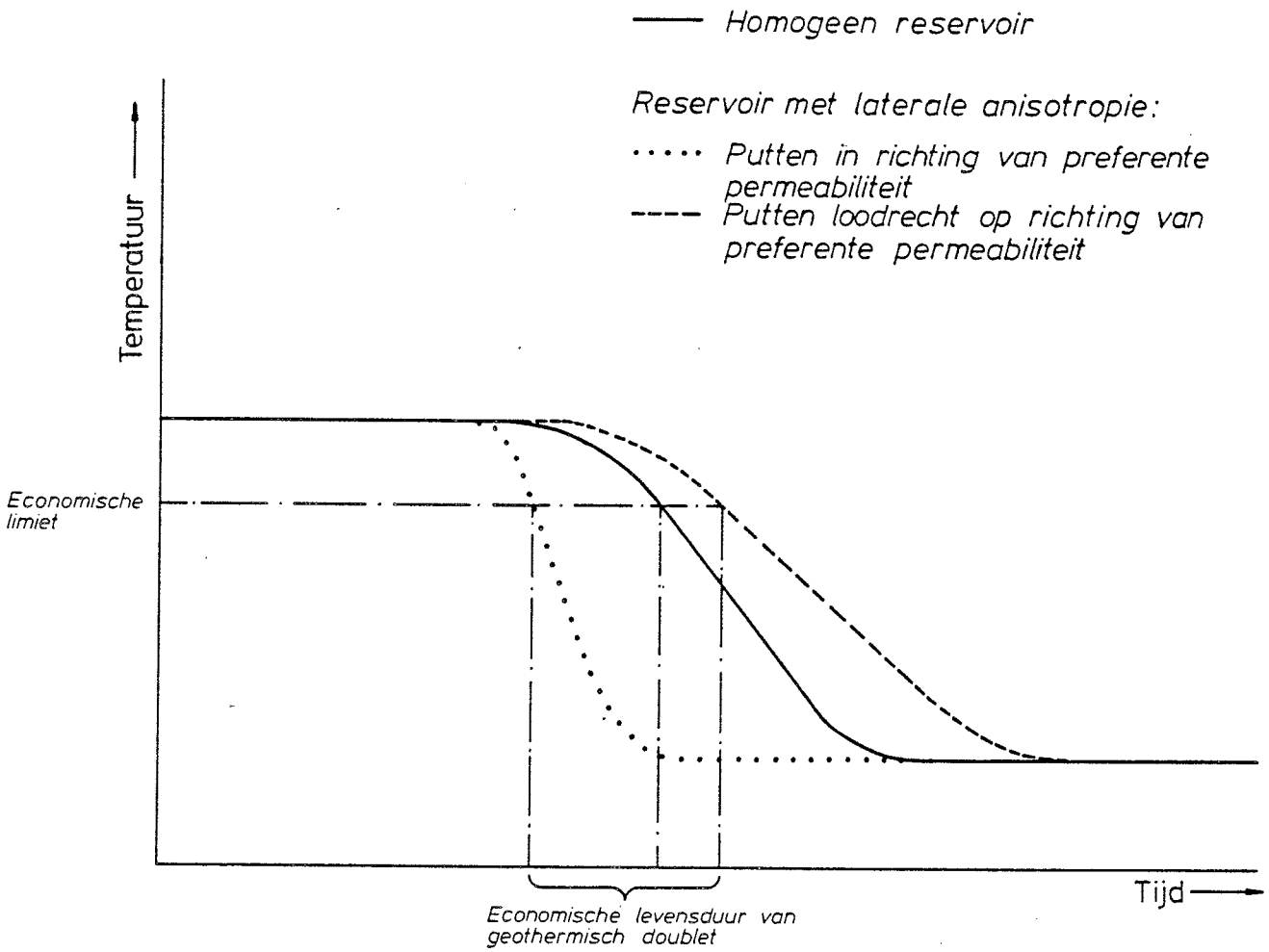


Fig. 2.9 Het temperatuurverloop als functie van de tijd in de produktieput van een geothermisch doublet

C 10.60/2.9

bepaald door de volumetrische soortelijke warmten van het gesteentemateriaal C_s ($J.m.^{-3}.K^{-1}$) en van het injectiewater C_w ($J.m^{-3}.K^{-1}$), en door de porositeit ϕ. Bij cilindervormige uitbreiding van het waterlichaam geldt voor de stralen van het warmtefront r_w en het injectiewaterfront r_{hydr} de betrekking (Van Dalfsen, nov. 1982, p.17):

$$r_w = \left\{ \frac{\phi C_w}{\phi C_w + (1-\phi) C_s} \right\}^{\frac{1}{2}} r_{hydr} \qquad (2.2.7)$$

Voor de verhouding r_w/r_{hydr} geldt in de praktijk ongeveer een waarde van 0,6.

Aardwarmtewinning

De economische levensduur van een aardwarmtewinningsproject wordt o.a. bepaald door de laagste temperatuur van het geproduceerde water waarbij het project nog rendabel is. In Fig. 2.9 wordt het temperatuurverloop in de productieput als functie van de tijd weergegeven. De getrokken lijn geeft het temperatuurverloop weer in een homogeen reservoir, d.w.z. in een reservoir waar de permeabiliteit overal even groot is. Heterogeniteit daarentegen manifesteert zich voornamelijk in de gelaagdheid van het reservoir. Water zal bij voorkeur stromen door lagen met een relatief hoge permeabiliteit.
Afgekoeld water, dat via delen van de ondergrond met hogere permeabiliteit gestroomd is, breekt door in de productieput; dit verschijnsel noemt men veelal macrodispersie. Vanaf dat moment gaat de temperatuur van het geproduceerde water afnemen, omdat steeds meer kouder water de productieput binnenstroomt.
De levensduur van een aardwarmteproject zal hierdoor negatief beïnvloed worden.
De permeabiliteitsverdeling kan niet alleen in verticale richting, maar ook lateraal variëren; het reservoir kan doorsneden worden door meer permeabele kanalen. Theoretisch gezien zijn er dan twee extremen mogelijk:

1. De putten zijn beide in één kanaal gesitueerd:
   In het kanaal zal eerder dan in een homogeen reservoir afgekoeld

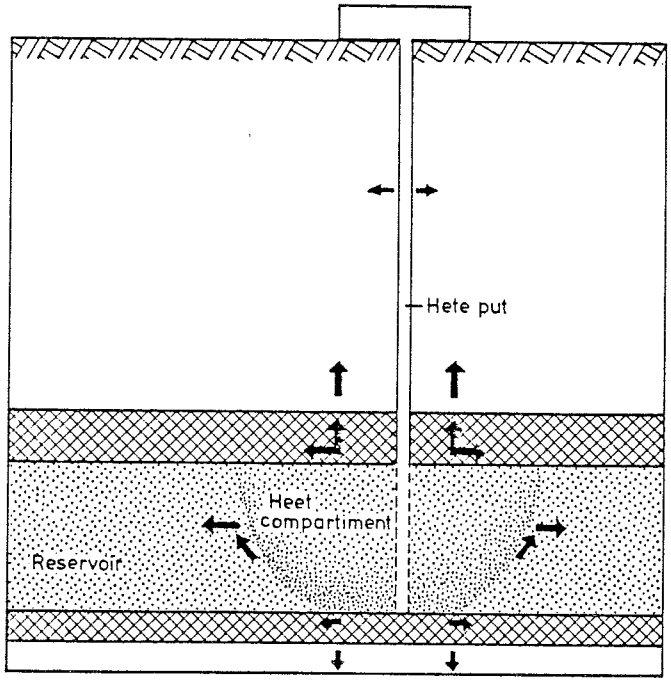


Fig. 2.10 Schematisch overzicht van ondergrondse warmteverliezen

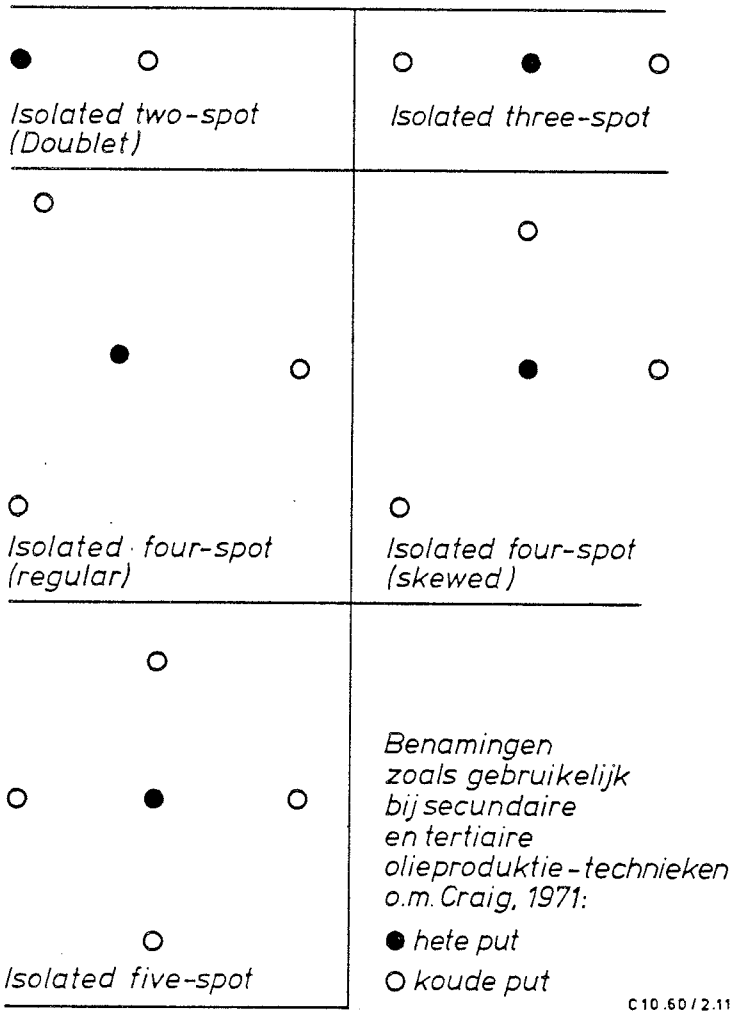


Fig. 2.11 Voorbeelden van put-configuraties

water doorbreken en zal bovendien de temperatuur van het water in de productieput na doorbraak sneller afnemen. In Fig. 2.9 is dit weergegeven met de gestippelde lijn.

2. De putten zijn in verschillende kanalen gesitueerd:
   De doorbraak laat langer op zich wachten en daarna neemt de temperatuur in de productieput langzamer af dan bij het doublet in een homogeen reservoir. In Fig. 2.9 is dit weergegeven met de gestreepte lijn.

In het algemeen zal in de praktijk een situatie tussen beide extremen bestaan.

Warmte-opslag

Het opslagrendement, ofwel de nuttige terugwinningsfactor, wordt in hoge mate bepaald door het verloop in de tijd van de temperatuur van het water uit de hete putten. Tijdelijke ondergrondse opslag van warmte gaat onvermijdelijk gepaard met warmteverlies. Oorzaak van dit warmteverlies is geleiding van warmte uit het geïnjecteerde hete water naar gesteentemateriaal en formatiewater met lagere temperatuur. Door warmtegeleiding verspreidt de ondergronds gebrachte warmte zich gaandeweg over een toenemend volume, waarbij het temperatuurniveau van het geïnjecteerde water door vereffening daalt.
De mogelijke warmteverliezen zijn schematisch weergegeven in Fig. 2.10.
Ook de permeabiliteitsverdeling heeft invloed op het warmteverlies uit het warmtereservoir. Doordat het water in het hete compartiment een geringere dichtheid heeft dan het water er buiten, wordt het hete water, met name aan de omtrek van het warmtereservoir, onder invloed van de zwaartekracht naar boven gedreven. Er treedt vrije convectie op, die extra warmteverlies naar de omgeving van het reservoir met zich meebrengt. De intensiteit van vrije convectie neemt toe met de permeabiliteit, in het bijzonder die in verticale richting. Naarmate het reservoir meer permeabel is en minder anisotroop, verbreidt het hete water zich sneller naar boven. In Nederland is de meerderheid van de aquifers anisotroop, onder andere door de aanwezigheid van horizontale kleilaagjes daarin. Dit werkt het opdrijven van heet water tegen. Zou een aquifer homogeen en isotroop zijn, dan is voor de permeabiliteit een grenswaarde op te geven,

waarboven onaanvaardbare warmteverliezen door vrije convectie optreden. Voor bijvoorbeeld een 25 m dik, isotroop warmtereservoir van 90 °C geldt een intrinsieke permeabiliteit van 3 μm^2=3000 mD (milli-Darcy) als bovengrens. In de praktijk zijn hogere waarden acceptabel voor de permeabiliteit in horizontale richting, als de permeabiliteit in verticale richting maar laag is; zie Van Dalfsen (1984, p. 11).

2.3 Dynamica van grondwaterstroming

Inherent aan het bedrijf van aardwarmtewinning en warmte-opslag is de stroming van water in de aquifer. Deze stroming ondervindt weerstand en moet gaande worden gehouden met pompen. Berging en winning van warmte kosten daarom een zekere hoeveelheid primaire energie, die nodig is om de pompen aan te drijven. Het spreekt vanzelf dat de benodigde hoeveelheid primaire energie per opslag-cyclus of bij winning in aanvaardbare verhouding moet staan tot de hoeveelheid nuttige warmte, onttrokken uit opslag of uit het formatiewater; zie ook 3.1.

Zowel bij aardwarmtewinning als bij warmte-opslag is de eenvoudigste puttenconfiguratie een doublet, bestaande uit één hete en één koude put. Een veel-puttenconfiguratie echter voldoet beter om de volgende redenen:

1. De massastromen per put zijn lager, waardoor de kans op putverstopping kleiner is.
2. De hydraulische weerstand van het ondergrondse deel van het opslag/winningssysteem is kleiner, waardoor minder pompvermogen nodig is.
3. Bedrijfsvoering van het opslag/winningssysteem is minder gevoelig voor het uitvallen van putten.

Voor warmte-opslag komen hier nog de volgende redenen bij:

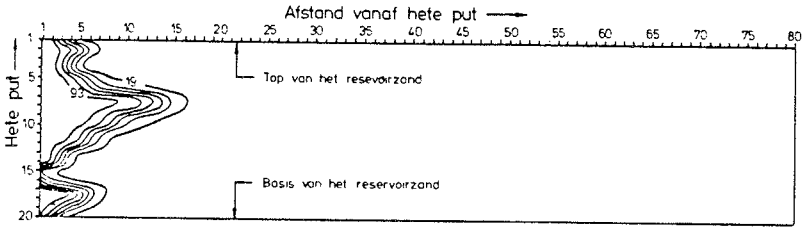
4. De drukveranderingen in en om de putten zijn kleiner waardoor minder kans bestaat op uitbraak van injectiewater uit de aquifer en daardoor daling van de druk tot kookpunt bij productie van water uit een reservoir met temperaturen boven 100 °C.
5. Het is mogelijk invloed uit te oefenen op de vorm van het hete compartiment en daardoor warmteverliezen te verminderen. Een veel-puttenconfiguratie met koude putten rondom een groep centrale hete putten is het meest geschikt; zie fig. 2.11.

2.4 Modelstudies

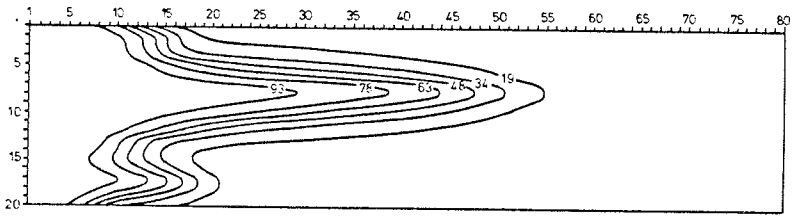
Alvorens een werkelijke proefneming met aardwarmtewinning of tijdelijke warmte-opslag te verrichten, kan het thermohydraulisch gedrag van een reservoir numeriek gesimuleerd worden. Op deze manier wordt kwantitatief inzicht verkregen in de verbreiding van heet water in een aquifer, in de ondergrondse warmtehuishouding en in het temperatuurverloop aan de hete putten bij warmte-onttrekking, dit zonder tijdrovende en kostbare veldexperimenten.
In eerste instantie is het aan te bevelen een denkbeeldig reservoir te modelleren, waarin stromings- en temperatuurveld cilindersymmetrisch zijn. Dit houdt in dat uitgegaan wordt van één centrale hete put met daaromheen een sleufvormige koude put in een reservoir, waarin geen van de fysisch ter zake doende grootheden verandert rondom de hete put. Hierdoor kan de omvang van het rekenwerk in deze onderzoeksfase worden beperkt.

Als voorbeeld is een model gemaakt van tijdelijke warmte-opslag; zie Van Dalfsen (1984,pp. 26-43). De simulatie is uitgevoerd met het computer-programma SWIP R (Survey Waste Injection Program, Revised), dat in opdracht van de United States Geological Survey (USGS) is opgesteld door INTERCOMP (1976) en INTERA (1979). Bij deze toepassing draaide het programma op een VAX 11/780, een scalaire computer van de Dienst Grondwaterverkenning TNO (DGV-TNO). Voor toekomstige meer omvangrijke simulaties ligt het voor de hand het programma op een vectorcomputer te draaien om de rekenkosten te beperken. Dit is vrijwel onvermijdelijk als in rekening gebracht moet worden dat stroming in de aquifer niet cilindersymmetrisch is. In werkelijkheid is er geen cilindersymmetrie, doordat de puttenconfiguratie en laterale veranderingen in het ondergrondse permeabiliteitsveld niet cilindersymmetrisch zijn.
Voor het in de simulatie gebruikte reservoir is een 32 m dik gelaagd pakket gekozen. Hiervoor stonden model de afzettingen tussen 73 m en 105 m diepte in de Formatie van Maassluis ter plekke van een boring in de Hoekse Waard (nr. 43 B-40 volgens het RID/RGD-Archief van Boringen); voor verdere fysische reservoirgegevens zie Van Dalfsen (1984, pp.27-28). De oorspronkelijke temperatuur op midden diepte, 89 m, van het reservoir is vastgesteld op 12 °C; de geothermische gradiënt op 0,02 $K.m^{-1}$. De volumestroom van het pendelende formatiewater bedraagt 150 m^3/h en de injectietemperatuur bedraagt 100 °C.

Temperatuurverdeling na 5 dagen accumulatie van warmte



Temperatuurverdeling na 80 dagen accumulatie van warmte



Temperatuurverdeling na 150 dagen accumulatie van warmte

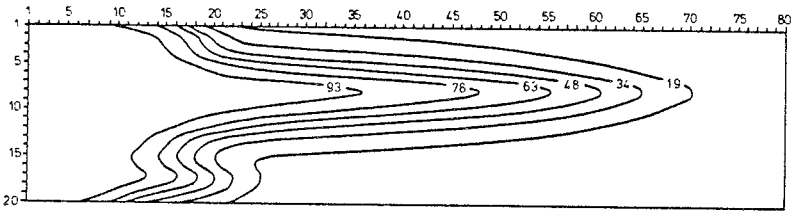
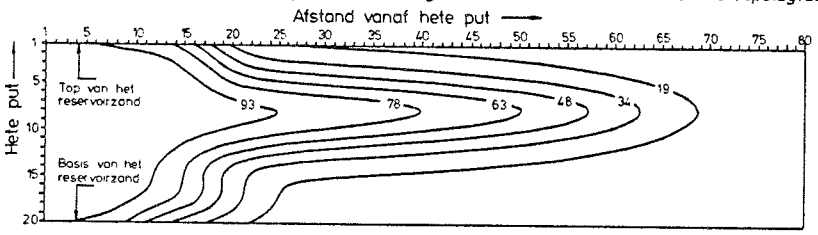
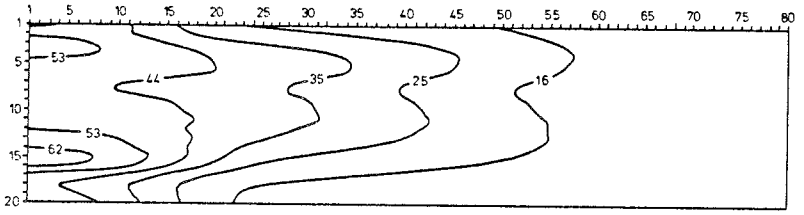


Fig. 2.12 Temperatuurverdeling in een gelaagd reservoirzand tijdens de accumulatiefase

Temperatuurverdeling 182 dagen na aanvang van de accumulatie van warmte (opslagfase)



Temperatuurverdeling 302 dagen na aanvang van de accumulatie van warmte (ontrekkingsfase)



Temperatuurverdeling 697 dagen na aanvang van de accumulatie van warmte

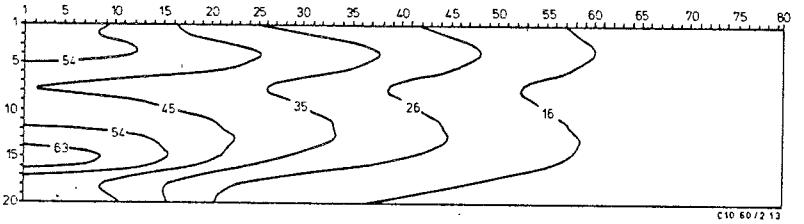


Fig. 2.13 Temperatuurverdeling in een gelaagd reservoirzand tijdens en na de opslag- en onttrekkingsfase(n)

Deze stroom loopt door een compleet afgewerkte, centrale hete put met een diameter van 34 cm. Een cyclus bestaat uit achtereenvolgens een bergingsfase van 150 dagen, een opslagfase van 32 dagen, een onttrekkingsfase van 150 dagen, en een rustfase van 33 dagen. Het thermohydraulisch gedrag van de aquifer in gebruik als warmtereservoir is gesimuleerd tot het begin van de rustfase in de tweede cyclus. De totale tijdsduur van simulatie bedraagt 697 dagen. Als voorbeeld worden enkele temperatuurprofielen getoond in Fig. 2.12 en Fig. 2.13.
Gedurende de onttrekkingsfase van de eerste cyclus daalt de temperatuur aan de hete put tot bijna 40 °C. In de tweede cyclus valt de warmte-onttrekking gunstiger uit; de temperatuur aan de hete put daalt dan tot bijna 50 °C. Bij elke volgende cyclus is een hogere eindtemperatuur te verwachten dan in de vorige; de verbeteringen nemen echter wel steeds kleinere vormen aan.

Een belangrijke grootheid van een opslagsysteem is het opslagrendement; zie sectie 2.2. Dit geeft per cyclus aan welk deel van de ondergronds opgeslagen warmte nog bruikbaar is indien de temperatuur bij onttrekking niet beneden een zeker minimum-niveau mag dalen. Uit de simulatie volgt dat bij een minimumtemperatuur van 12 °C het opslagrendement 65% is na de eerste cyclus en 75% na de tweede cyclus. Voor een minimumtemperatuur van 50 °C bedragen deze factoren respectievelijk 20% en 28%. Voor tussenliggende temperaturen mag lineair geïnterpoleerd worden. Voorts blijkt dat met het gebruikte permeabiliteitsmodel (gelaagde aquifer met permeabiliteiten uiteenlopend van 0,1 μm^2=100 mD tot 8 μm^2=8000 mD) de invloed van vrije convectie op het temperatuurveld boven in het reservoir niet opweegt tegen de warmtegeleiding.

2.5 Putten en putverstoppingen

Putverstopping manifesteert zich door toename van het benodigde drukverschil bij een zekere massastroom, of door een afnemende massastroom bij constant drukverschil. Deze veranderingen kunnen na verloop van tijd zo ingrijpend worden dat injectie of onttrekking moet worden stopgezet. Putverstopping is te wijten aan toename van de hydraulische weerstand op of nabij de overgangen put-putomstorting en putomstorting-aquifer.

omschrijving ATES proj.	injectie-temp.	chem.effecten		fys.effecten		biotische effecten		referenties
		probleem	remedie	probleem	remedie	probleem	remedie	
Campuget Frankrijk	30 °C					plaatselijke bact.groei	chlorine injectie	Tsang et al. 1982
Hørsholm Denemarken	100 °C		zuur op voorhand toegevoegd		deeltjes-filter op voorhand toegevoegd			Hagelskjaer et al. 1983
Mobile Alabama	35 °C			clogging suspensie-last en zwelling, dispersie en migratie van klei	'backwash-ing' en filter (5 µm), gebruik grondwater als injec-tie-vloei-stof			Molz et al. 1978 PNL 1982
SPEOS Lausanne	60 °C	snelle neer-slag van o.a. $CaCO_3$ (sca-ling) en Fe $(OH)_3$, op-lossing van SiO_2 (o.a. van kleimi-neralen) en neerslag si-licagel	scale werd met HCl schoonge-maakt (gaf echter cor-rosie van de pompen)	migratie kleideel-tjes en suspensie-last ($CaCO_3$, $Fe(OH)_3$) gaf verstopping				Miserez, 1980 Sauty et al. 1982
St.Paul's Minnesota	90 °C	neerslag Ca CO_3 en vor-ming corro-sieproducten	precipita-tor/filter werd inge-schakeld	plugging en clogging door $CaCO_3$ en cor-rosieproduc-ten	precipita-tor na schoonma-ken put met zuur	geen invloed afname hoeveel-heid bacteriën		Molz et al. 1978 PNL 1982
Yamagata Basin Japan	25 °C							Tsang et al. 1982

Overzichtstabel van de problemen die tot nu bij warmte-opslag zijn waargenomen.

Bij verstopping van putten kunnen onder andere de volgende factoren worden aangegeven als mogelijke oorzaak:

- deeltjes in het water
- gas- en luchtbellen in het water
- slijm gevormd na explosieve groei van bacteriënkolonies in en om de putten
- chemische neerslag in en om de putten, eventueel door katalyse van aanwezige bacteriën
- zwelling en dispersie van kleideeltjes in de aquifer.

De problemen die zich zouden kunnen voordoen, en die ook zijn opgetreden bij bestaande projecten worden samengevat in de tabel op pag. 34.

Bij toepassing van een opslagsysteem zoals eerder beschreven, is het verstoppingsgevaar in het algemeen kleiner dan bij andere systemen. Dit komt doordat in deze opstelling de warmte vervoerd wordt door water uit dezelfde watervoerende lagen als die van het warmtereservoir.

Een put die door deeltjes in het injectiewater verstopt raakt, is gewoonlijk, door tijdelijke omkering van de stromingsrichting, weer in bruikbare toestand te brengen.

Toepassing van een gesloten systeem reduceert de kans op putverstopping door gas- en luchtbellen.

Het al dan niet optreden van putverstopping door slijm, gevormd na explosieve groei van bacteriënkolonies in en om een put, hangt af van de temperatuur daarin. In het bijzonder in de koude putten kunnen de omstandigheden hiervoor gunstig zijn.

Chemische neerslag in en om de putten is een belangrijke oorzaak van putverstopping in een opslagsysteem.
Deze neerslagvorming is toe te schrijven aan verandering van het chemisch-thermodynamisch evenwicht in het pendelende water, en tussen gesteentemineralen en water rond de putten in het warmtere-

servoir. De temperatuurveranderingen, die in het opslagsysteem optreden, zijn oorzaak van de evenwichtsverstoringen. Hierdoor raken evenwichten uit balans, gaan stoffen op de ene plaats in oplossing en slaan na transport elders weer neer; dit gebeurt onder andere in en om de putten en in de warmtewisselaar. Met andere woorden: bij bedrijf van een opslagsysteem met een aquifer als warmtereservoir treedt er naast het water- en warmtetransport ook nog een systematisch materietransport op, met name van calciumcarbonaat, en in mindere mate van siliciumoxyden. Het transport van deze stoffen vindt in tegenovergestelde richtingen plaats: siliciumoxyden slaan neer in het koude gedeelte van het opslagsysteem en calciumcarbonaat in het hete gedeelte. Neerslag van calciumcarbonaat heeft een alledaags voorbeeld in de aangroei van deze stof (ketelsteen) in huishoudelijke apparaten.

Wanneer de ionen-concentraties in een oplossing veranderen (bijvoorbeeld oplossing van $CaCO_3$) kan bovendien zwelling en dispersie van kleimineralen optreden. Of er dispersie en kleizwelling optreedt is afhankelijk van de aanwezige typen kleimineralen in relatie tot de oorspronkelijke grondwaterkwaliteit en de mate van verandering.

3. ENERGIEBALANS

3.1 Thermische en hydraulische factoren

Binnen een hydraulisch homogeen reservoir treedt alleen warmteverlies op door temperatuurvereffening aan het warmtefront. Door geleiding van warmte uit het hete naar het koude compartiment wordt het warmtefront onscherp. Hierdoor blijft, in geval van terugwinning van hetzelfde volume water als oorspronkelijk geïnjecteerd is, een deel van deze warmte achter in het reservoir en in de aangrenzende kleilagen. Warmteverlies door geleiding in horizontale richting is bij niet te lange opslagduur evenwel niet groot, zodat het in de eenvoudige modellen verwaarloosd wordt. Bij verwaarlozing van het warmteverlies binnen het opslagreservoir blijft dan alleen warmteverlies naar de aangrenzende kleilagen over.

In een opslagsysteem moet de massastroom gaande worden gehouden door pompen. Deze ontlenen hun vermogen rechtstreeks aan brandstoffen (gas, olie of steenkool) of indirect aan brand- of splijtingsstoffen (uranium) als ze elektrisch worden aangedreven. De benodigde primaire energie hangt af van het gebruikte pompvermogen en van het rendement van de omzettingen waarmee dit pompvermogen wordt afgeleid uit primaire energie. Tussen de verschillende vormen van primaire energie kunnen nog grote prijsverschillen bestaan.
Als de prijs P_w (gulden) van de totaal benodigde hoeveelheid primaire energie W (Joule) kleiner is dan de prijs P_q (gulden) van de hoeveelheid teruggewonnen warmte Q_u (Joule) ($P_w < P_q$), dan is het opslagsysteem uit het oogpunt van energiehuishouding onvoorwaardelijk voordelig.
Om dit te verduidelijken geven we het volgende, niet onrealistische, voorbeeld. Een stadsverwarmingswijk van 7000 woningen heeft een bruto warmtevraag van 400 TJ ($1TJ=10^{12}J$) op jaarbasis. 10% van de warmte wordt geleverd via warmte-opslag, d.w.z. $40TJ=40x10^{12}J$. Bij stadsverwarming geldt een prijs van *f* 20,00/GJ ($1GJ=10^{9}J$); de teruggewonnen 40TJ vertegenwoordigt dus een bedrag van *f* 800.000,--. Het benodigde pompvermogen wordt elektrisch opgewekt voor een prijs van *f* 0,14/kWh= *f* 40,00/GJ elektrisch vermogen. Een redelijke schatting voor de benodigde elektrische pompenergie is 2TJ hetgeen

dus ƒ 80.000,-- kost. In dit voorbeeld bedraagt het batig verschil ƒ 720.000,-- en is het opslagsysteem onvoorwaardelijk voordelig vanuit het oogpunt van energiehuishouding.
Bij $P_w > P_q$ is het opslagsysteem nog voordelig als van de prijs van de benodigde hoeveelheid teruggewonnen warmte P_q, een fractie f ($0<f<1$) afkomstig is van de prijs van de hoeveelheid primaire energie P_w, zodanig dat $P_w < P_q (1+f)$. Het laatste geval, waarin de energiebalans van het opslagsysteem voorwaardelijk positief is, moet evenwel als buitengewoon worden aangemerkt; zie Van Dalfsen (november 1982, pp. 10-11).
Bijvoorbeeld: indien in het eerder gegeven numerieke voorbeeld de benodigde elektrische pompenergie 21TJ bedraagt (bijvoorbeeld doordat verstopping optreedt) kost dat ƒ 840.000,--. De pompen verbruiken dan ƒ 40.000,-- meer dan er aan in geld uitgedrukte hoeveelheid opgeslagen warmte uit het reservoir komt, d.w.z. het opslagsysteem is niet onvoorwaardelijk voordelig. Nu wordt echter een deel van de door de pompen geleverde mechanische energie in het reservoir omgezet in wrijvingswarmte. Stel dat deze hoeveelheid 14%, dus 3TJ bedraagt, hetgeen overeenkomt met een prijs van ƒ 120.000,--. Echter, aangezien deze elektrische energie is omgezet in warmte brengt ze nog maar ƒ 60.000,-- op. De totale hoeveelheid teruggewonnen warmte komt dus overeen met een bedrag van ƒ 860.000,--; hiervan is f=6/86=7% afkomstig van de prijs van de hoeveelheid primaire energie. We zien dat in dit geval het batig verschil toch nog ƒ 20.000,-- bedraagt.

Het deel van de noodzakelijke primaire energie dat als warmte teruggewonnen wordt komt o.a. voort uit dissipatie van mechanische energie. Deze vindt plaats waar de stroming in het opslagsysteem hydraulische weerstand ondervindt. Deze weerstand treedt op in het gehele opslagsysteem: warmtewisselaars, toe- en afvoerleidingen, putten en het ondergrondse reservoir. De kunstmatig aangelegde onderdelen van het opslagsysteem worden zo ontworpen dat de weerstand hiervan binnen aanvaardbare grenzen ligt wanneer de onderdelen ideaal functioneren.
Hiermee wordt bedoeld dat in en om de putten of in de warmtewisselaar(s) de hydraulische weerstand niet buitensporig toeneemt door verstoppingen.

De hydraulische weerstand van het ondergrondse reservoir is grotendeels een natuurlijk gegeven. Bij ideale putten (geen of verwaarloosbare putverstopping) draagt deze weerstand het meeste bij tot de totale hydraulische weerstand in het opslagsysteem. Maatgevend voor de weerstand van het reservoir is het drukverschil tussen productie- en injectieput dat gehandhaafd moet worden om een constante massastroom in het systeem in stand te houden. Dit drukverschil bepaalt in hoge mate het benodigde pompvermogen in het opslagsysteem.
Als tussen productie- en injectieput een drukverschil $\Delta p=p_1-p_2>0$ moet worden gehandhaafd om een massastroom $\dot{m}$, uit (of in) het reservoir te laten vloeien dan wordt het pompvermogen P, dat minstens nodig is, gegeven door de betrekking $P=\dot{V}_1\Delta p+p_2\Delta\dot{V} = \dot{V}_2\Delta p+p_1\Delta\dot{V}$; hierin is $\dot{V}_1$ de volumestroom bij druk p_1, $\dot{V}_2$ de volumestroom bij druk p_2 en $\Delta\dot{V}=\dot{V}_1-\dot{V}_2$. Indien er geen stoomvorming optreedt is de term met $\Delta\dot{V}$ verwaarloosbaar klein. Het werkelijk benodigde pompvermogen is groter door overgangsweerstanden tussen de put en het reservoir, wrijvingsverliezen in put en leidingen en door het niet optimale rendement van de pomp. Het vermogen P is gelijk aan de warmteproductie door wrijving W. Het grootste deel van deze warmte wordt ontwikkeld in de aquifer; de verdeling van de totale warmteproductie in de aquifer hangt af van de ruimtelijke verdeling van de lokale hydraulische weerstand daarin.

3.2 Rendementen en temperatuurniveau's

Van belang voor het opslagrendement van een warmte-opslagsysteem is de zogenaamde terugwinningsfactor. De terugwinningsfactor ε is gedefinieerd als de verhouding tussen de geïnjecteerde warmte en de warmte die teruggetransporteerd wordt uit het opslagreservoir in dezelfde massa water als geïnjecteerd. Opgemerkt wordt dat de terugwinningsfactor ε in de regel hoger is dan het opslagrendement η_s van de opslagcyclus. Deze laatste grootheid wordt bepaald door de laagste temperatuur Θ_{hu}, waarbij nog warmte onttrokken kan worden uit het teruggepompte water. In Fig. 3.1 zijn berekende terugwinningsfaktoren bij de eerste en vijfde cyclus van warmte-opslag in een homogeen reservoir uitgezet (deze figuren zijn ontleend aan Doughty et al.).

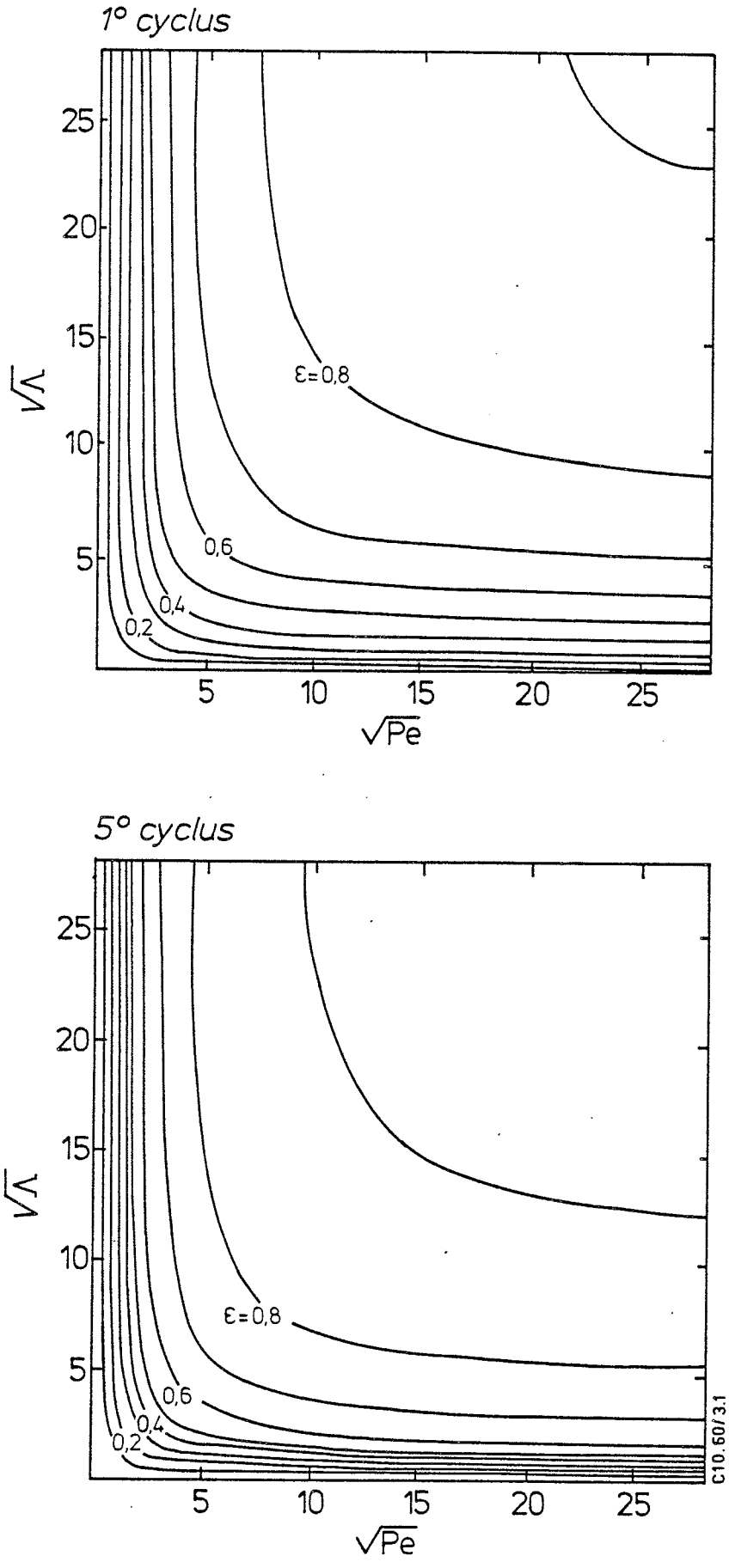


Fig. 3.1 Terugwinningsfactoren (ε) bij de eerste en de vijfde cyclus bij opslag van warmte in een homogeen reservoir (naar Doughty et al, 1981)

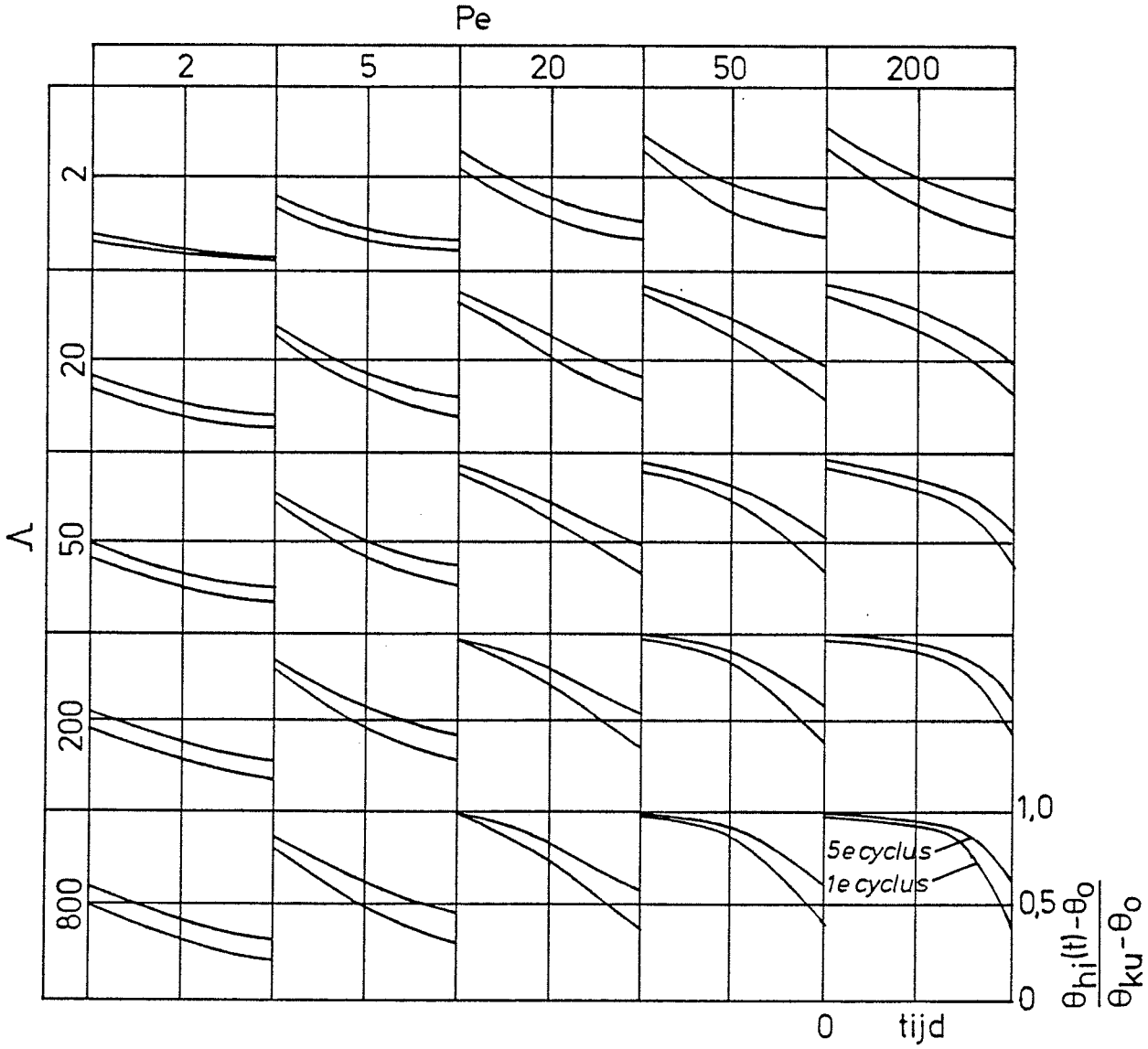


Fig. 3.2 Temperatuurverloop aan de hete put bij onttrekking van warmte tijdens de eerste èn de vijfde opslagcyclus (voor verschillende combinaties van Λ- en Pe-getal; naar Doughty et al., 1981)

C10.60/3.2

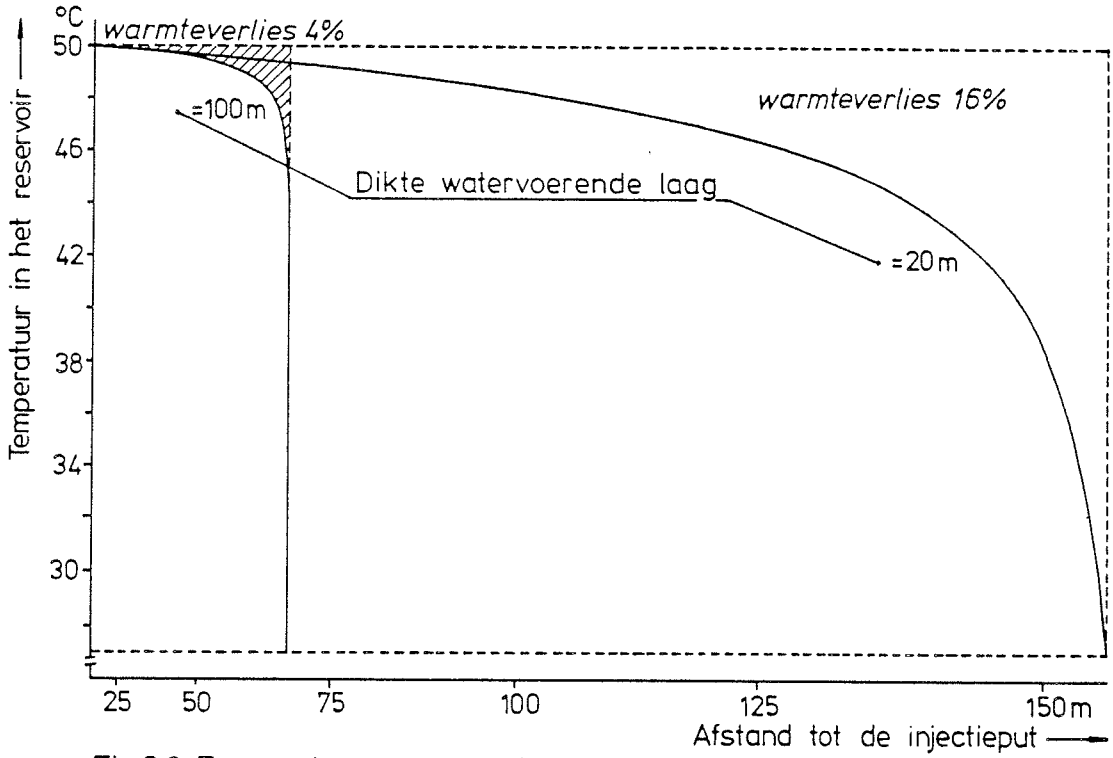


Fig.3.3 Temperaturen en warmteverliezen in een reservoir. (model Gringarten & Sauty)

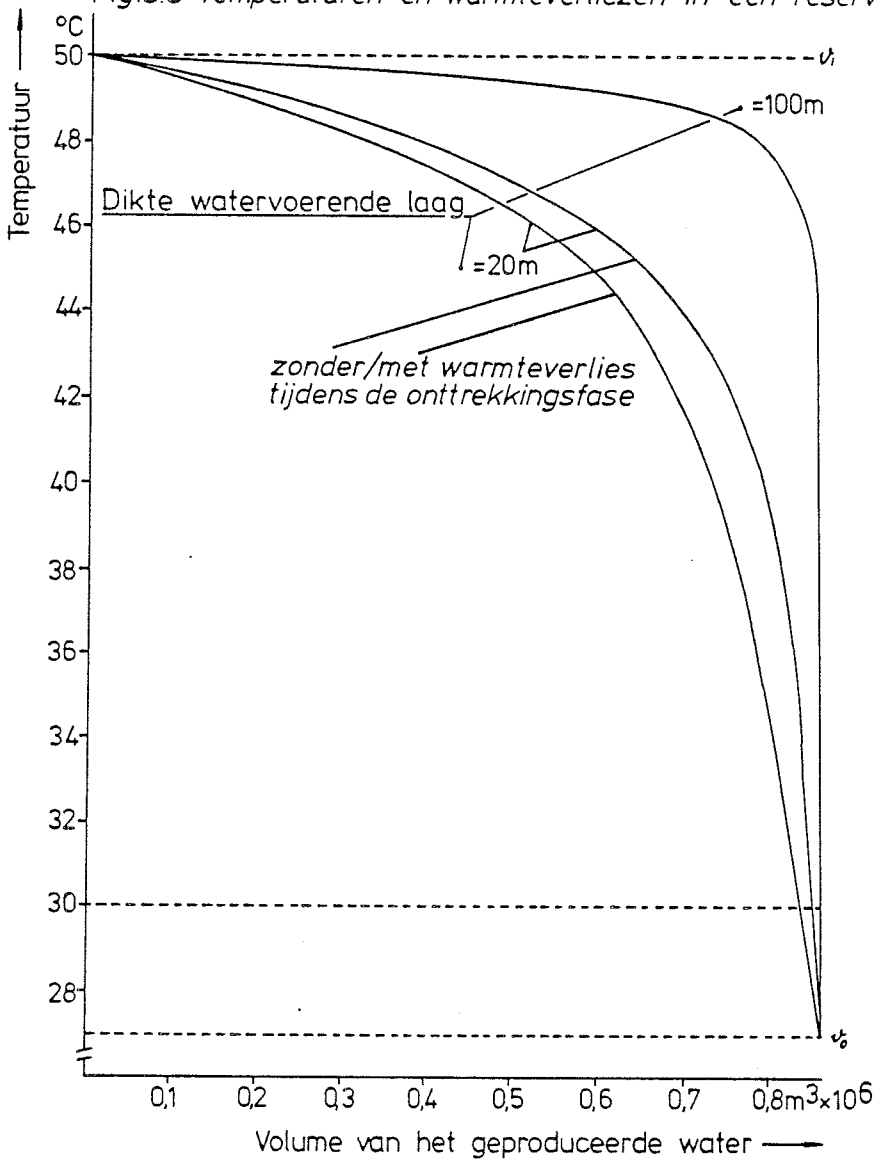


Fig.3.4 Temperatuur aan de hete put als funktie van de geproduceerde hoeveelheid water. (model Gringarten & Sauty)

De dimensieloze getallen Pe (getal van Péclet) en Λ in deze figuren zijn gedefinieerd als:

$$Pe = \frac{C_w}{\lambda} \frac{\dot{V}}{2\pi D_r} \qquad (3.2.1)$$

$$\Lambda = \frac{C_r^2 D_r^2}{C_c \lambda t_i} \qquad (3.2.2)$$

hierin is:

C_c	= volumetrische soortelijke warmte van aangrenzend gesteente	$(J.m^{-3}.K^{-1})$
C_r	= volumetrische soortelijke warmte van opslagreservoir	$(J.m^{-3}.K^{-1})$
C_w	= volumetrische soortelijke warmte van injectiewater	$(J.m^{-3}.K^{-1})$
D_r	= dikte van watervoerende laag	(m)
t_i	= opslagtijd = terugwintijd	(s)
$\dot{V}$	= volumestroom aan hete put	$(m^3.s^{-1})$
λ	= warmtegeleidingscoëfficient van watervoerende laag en aangrenzend gesteente	$(W.m^{-1}.K^{-1})$

De uitkomsten betroffen een configuratie met een ring van koude putten rond één hete put. We zien dat in dit geval een terugwinningsfactor van 80% zeker haalbaar is. Echter, zoals is aangetoond door de resultaten van de modelstudie (sectie 2.4) ligt het opslagrendement aanzienlijk lager, afhankelijk van de minimum temperatuur waarbij de warmte nog bruikbaar is (Van Dalfsen, 1984, p. 37). In Fig. 3.2 wordt het hierbij behorende berekende temperatuur-verloop aan de hete put bij terugwinning weergegeven. Uit de figuren blijkt dat zowel de terugwinningsfactor als de temperatuur bij terugwinning hoger zijn naar mate het Pe-getal en Λ-getal groter zijn.

Ter illustratie geeft Fig. 3.3 de berekende temperatuur in twee homogene reservoirs van respectievelijk 20 m en 100 m dikte elk na 90 dagen injectie met een volumestroom van 400 m^3/h. Van belang hierbij is ook Fig. 3.4 waarin berekende temperaturen aan de productieput bij oplopend volume van het teruggewonnen water gegeven worden (Van Dalfsen, feb. 1982, pp. 9-15).

4. TERTIAIRE EN KWARTAIRE RESERVOIRZANDEN

4.1 Algemeen

Het geologisch en hydrogeologisch onderzoek van de zandige tertiaire en kwartaire afzettingen, die in de ondergrond van Nederland voorkomen, is er op gericht te bepalen welke zandige afzettingen in principe in aanmerking komen om als reservoirgesteente voor aardwarmtewinning en/of voor grootschalige opslag van warmte te fungeren.

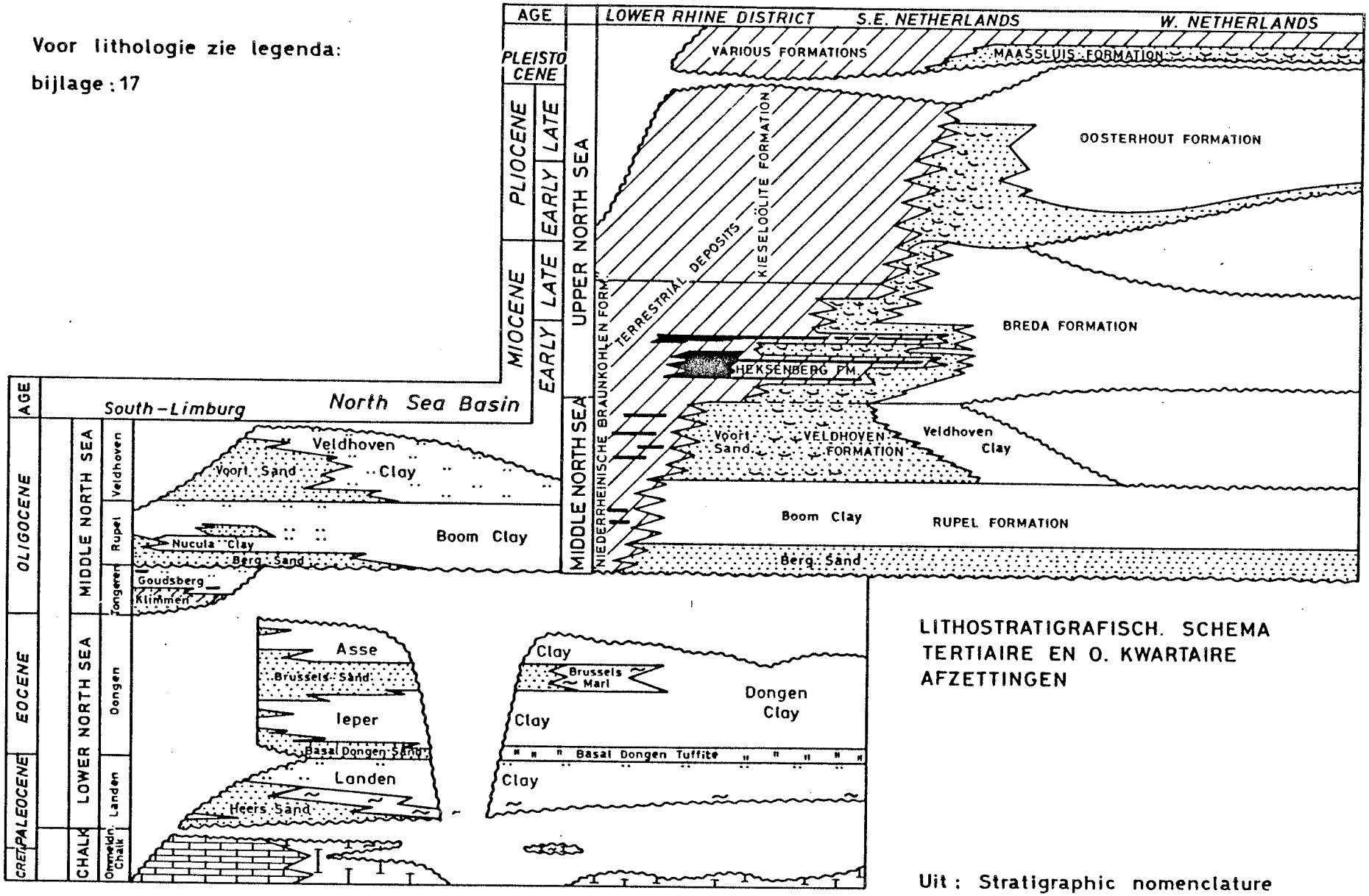
De (hydro)geologische kenmerken die de zandige afzettingen dienen te hebben om geschikt te zijn als reservoirgesteente worden in paragraaf 4.3 behandeld. Deze kenmerken betreffen de lithologische samenstelling, de dikte, diepteligging en laterale uitgestrektheid, alsmede de permeabiliteit en porositeit van de potentiële reservoirzanden. De ontstaanswijze van de afzettingen en de geschiedenis ervan is bepalend voor deze kenmerken. Voor een goed begrip van de eigenschappen van de tertiaire en kwartaire afzettingen is derhalve inzicht in de geologische geschiedenis van het Tertiair en Kwartair in Nederland noodzakelijk (paragraaf 4.2). De lithologische samenstelling, de geometrie en de permeabiliteit van de verschillende tertiaire en kwartaire zandige afzettingen worden beschreven in de paragrafen 4.4 en 4.5. Kaarten waarop dikte, de diepteligging en de laterale uitgestrektheid van de potentiële reservoirzanden in het Tertiair en het Onder-Kwartair van Nederland zijn weergegeven, vormen de belangrijkste bijlagen. Tevens wordt de geschiktheid van de reservoirzanden voor lage temperatuur-aardwarmtewinning en/of grootschalige opslag van warmte aangeduid.

Aangezien behalve de eigenschappen van de reservoirzanden ook de eigenschappen van het daarin aanwezige formatiewater van groot belang zijn bij zowel aardwarmtewinning als grootschalige opslag van warmte, wordt de samenstelling van het formatiewater (met name het zoutgehalte) kort behandeld in paragraaf 4.6. Een toelichting op de bijlagen wordt in paragraaf 4.7 gegeven.

4.2 Geologische geschiedenis

Het beschrijven van de geologische (ontstaans-)geschiedenis van de tertiaire en kwartaire afzettingen in Nederland valt strikt genomen

Voor lithologie zie legenda:
bijlage : 17



LITHOSTRATIGRAFISCH. SCHEMA
TERTIAIRE EN O. KWARTAIRE
AFZETTINGEN

Uit : Stratigraphic nomenclature

Fig. 4.1 Stratigrafisch schema van de Onder, Midden en Boven Noordzee Groepen.

buiten het kader van het project. Gezien de relatie die er echter is tussen de afzettingsgeschiedenis van een zandlichaam en de bruikbaarheid ervan voor opslag van (warm)water of winning van lage temperatuur aardwarmte lijkt een summiere behandeling van deze geschiedenis op zijn plaats.

De opzet van dit hoofdstuk is deels gebaseerd op de in 1983 verschenen publicatie van Letsch & Sissingh.
In hun publicatie wordt ons inziens terecht een link gelegd tussen wereldwijde of grootschalige gebeurtenissen, zoals bijvoorbeeld zeespiegelrijzingen (transgressieve fasen) en -dalingen (regressieve fasen) of veranderde tektonische regimes gedurende het Tertiair en (geologische) ontwikkelingen in Nederland.

Voor de beschrijving van de geologische gebeurtenissen gedurende het Tertiair (Paleogeen en Neogeen) werd gesteund op verschillende publicaties. Naast een beperkt aantal algemene publicaties betreffende sedimentologie/stratigrafie gaat het hier om een aantal sterk op NW Europa en Nederland gerichte publicaties, zoals die van Zagwijn & Doppert (1978), Zagwijn (1979), Ziegler (1978), Van de Bosch, Cadée & Jansen (1975), Thiadens (1968), Ten Dam (1944), Heybroek (1974) en Keizer & Letsch (1963).
In Fig. 4.1 is de stratigrafische indeling van de tertiaire en onder-kwartaire afzettingen in Nederland weergegeven.

4.2.1 Paleogeen

De afzetting van de paleogene sequentie in Nederland is in sterke mate beïnvloed door cycli van wereldwijde mariene trans- en regressies in (een) bekken(s) waarvan (vrijwel) geheel Nederland deel uitmaakte. De globale positie van de bekkenranden is te zien in Fig. 4.2.

In Fig. 4.3 is een lithostratigrafisch schema weergegeven van de top Chalk, Onder- en Midden Noordzee Groepen. Het is het beeld van een cyclische sequentie volmariene kleien, afgewisseld door ondiep mariene tot kustnabije, deels littorale zanden en lagunaire kleien, gelegen op de vroeg-paleocene Ommelanden Chalk.

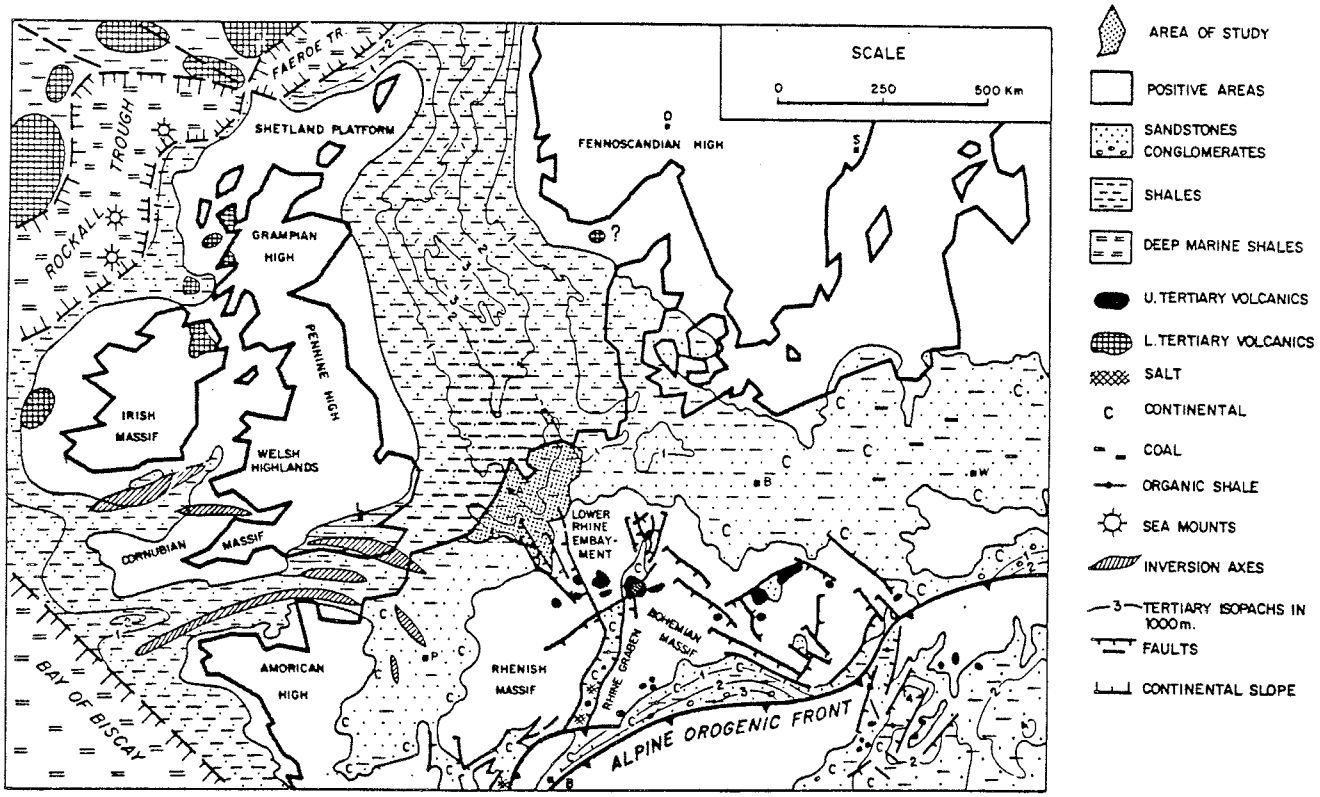


Fig. 4.2 Paleogeografie van het Tertiair van NW-Europa (Naar Ziegler, 1978)

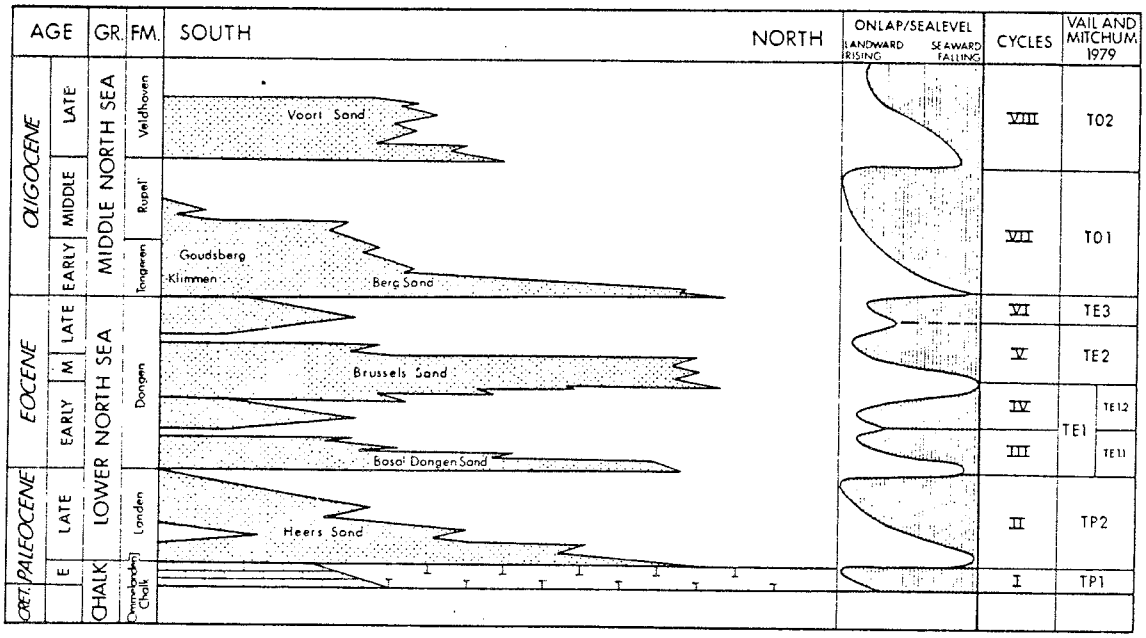


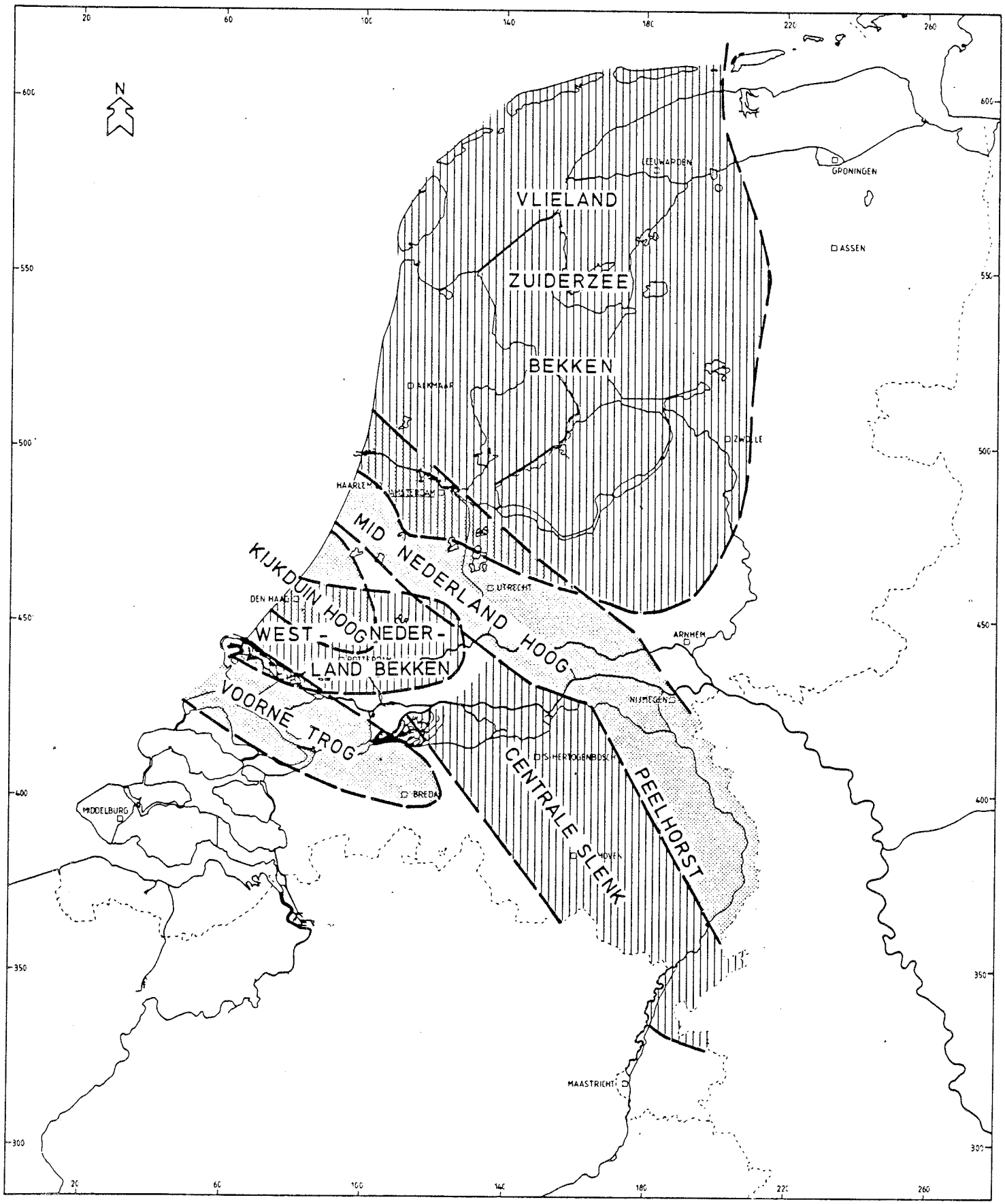
Fig. 4.3 Curve van zeespiegelbewegingen gedurende het Paleogeen in Nederland (Naar Letsch en Sissing, 1983)

De sequenties van Onder en Midden Noordzee Groepen kunnen gezien worden als resultaat van 8 transgressieve-regressieve cycli van sedimentatie (cycles I t/m VIII; Hardenbol & Berggren, 1978). Deze corresponderen met wereldwijde zeespiegelveranderingen en correleren met de vroeg-kenozoïsche cycli van Vail & Mitchum (1979).

De dikte en verbreiding van de afzettingen van de Ommelanden Chalk en de gehele Onder Noordzee Groep zijn in sterke mate gereduceerd door resp. de Laramide en de onder-oligocene erosiefase. De Savische erosiefase reduceerde vooral de afzettingen van de Midden Noordzee Groep.

Gedurende het Boven-Krijt en vroegste Paleoceen werd de Ommelanden Chalk afgezet tijdens een transgressieve fase die reeds in het Cenomaan begon. De Laramide erosiefase liet slechts in de zuidelijke en centrale delen van Nederland erosieresten van de paleocene Ommelanden Chalk achter. De oudste formatie van de Onder Noordzee Groep, de Formatie van Landen, is transgressief vanuit het noorden afgezet over heel Nederland. Gelet op het primaire dikteverloop over geheel Nederland zijn er twee hoofdbekkens te onderscheiden: één in zuid-west Nederland, het ander in het noorden van Nederland. Deze bekkens werden van elkaar gescheiden door het (submariene?) WNW-OZO georiënteerde Mid Nederland Hoog; zie Fig. 4.4.

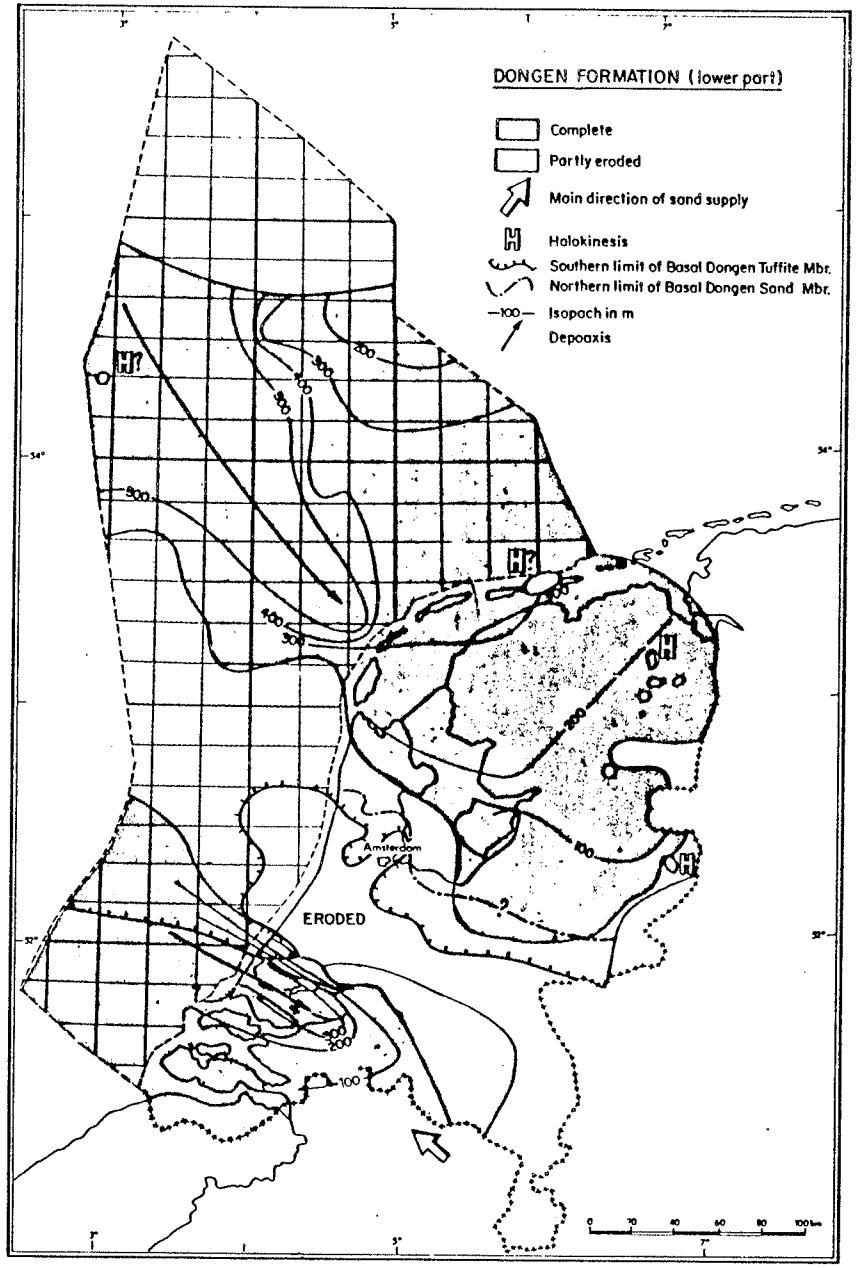
In het zuidelijke bekken vond eerst afzetting plaats van het tufkrijt van de Formatie van Houthem waarna het Zand van Heers en de Klei van Landen s.s. werden afgezet. Het Zand van Heers kan hier onderverdeeld worden in limnisch Montien, Zand van Heers s.s., en Mergel van Heers.
In het noordelijke bekken zijn twee lithostratigrafische eenheden te herkennen: een basale zandige eenheid, die vermoedelijk het Zand van Heers vertegenwoordigt, en de Klei van Landen.
De afzetting van de Formatie van Landen werd beëindigd door een korte regressieve fase, waarin de formatie, voornamelijk in centraal Nederland, door erosie in dikte gereduceerd werd of zelfs geheel verdween (Twente, ZO-Drenthe en de noordflank van het Mid Nederland Hoog). Niet duidelijk is of in de diepere delen van het paleobekken sprake is geweest van non-depositie of zelfs doorgaande sedimentatie.



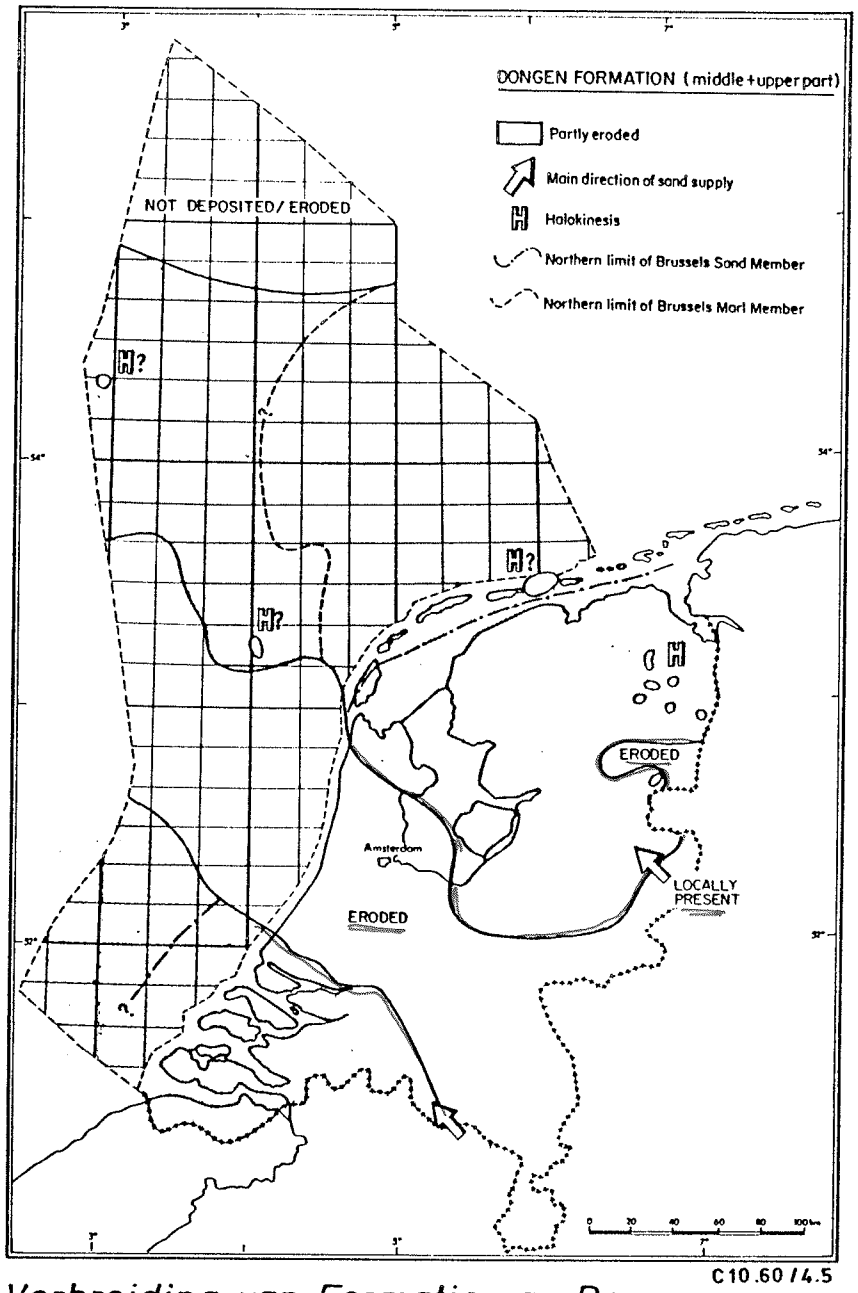
C10.60/4.4

Fig. 4.4 Belangrijke structurele elementen gedurende Tertiair en Onder- Kwartair

De volgende sedimentatiecyclus resulteerde in de afzetting van de Formatie van Dongen over geheel Nederland. In zuidelijk en zuidoostelijk Nederland wordt op de overgang van de Formatie van Landen naar de Formatie van Dongen een zandige eenheid aangetroffen, waarin een 'coarsening upward' sequentie herkenbaar lijkt. Dit zou de regressieve top-sequentie van de Formatie van Landen kunnen representeren. Of en in hoeverre de top van deze eenheid later omgewerkt is tot het 'basale' Zand van Dongen is niet geheel zeker, maar dit lijkt zeer waarschijnlijk. Onzekere datering maakt het vooreerst onmogelijk deze eenheid in Paleoceen of Eoceen te plaatsen.
Direct ten zuiden van het Mid Nederland Hoog treffen we aan de basis van de Formatie van Dongen het Basale Zand van Dongen aan. Ten noorden van dit Hoog is deze eenheid van een duidelijk andere lithologie en spreekt men van het Basale Zand/Tuffiet van Dongen. Dit bevat forse inschakelingen van tuffiet en is beduidend minder zandig ontwikkeld dan in Zuid-Nederland. Deze tuffietafzettingen hangen samen met vulkanisme gedurende het Onder-Eoceen in het gebied van de Rockall-Faeroe Trough (N en NW van Schotland), en het huidige Skagerrakgebied; vergelijk Fig. 4.2.
Volgens Ten Dam (1944) zou er gedurende het gehele Onder-Eoceen sprake zijn geweest van twee gescheiden bekkens: één in Z(W) Nederland, het andere in N(O) Nederland. Zijn gedetailleerde studie van de microfauna leidde tevens tot de conclusie dat het basale deel van de Klei van Ieper in het noordelijke bekken een brakwaterafzetting representeert. Verbeek (pers.comm.) concludeert op grond van (voorlopige resultaten van) nannoplankton-onderzoek eveneens dat er deels een gescheiden ontwikkeling van de Klei van Ieper aantoonbaar is in het noorden en zuiden van Nederland. Ten Dam poneert een gelijktijdige maar gescheiden ontwikkeling van de bekkens, Verbeek daarentegen meent dat de sedimentatie op verschillende momenten inzet in de beide bekkens. Volgens Ten Dam zijn het Zand van Brussel en de Klei van Asse oorspronkelijk wel over geheel Nederland afgezet.
Volgens Letsch & Sissingh (1983) daarentegen zou iedere eenheid binnen de Formatie van Dongen (inclusief de Klei van Ieper) oorspronkelijk min of meer uniform en synchroon over geheel Nederland afgezet zijn. De invloed van het Mid Nederland Hoog op de afzetting van deze eenheden is niet eenduidig. De afwezigheid van de Formatie



Verbreiding van Formatie van Dongen
(Onder Eoceen)



Verbreiding van Formatie van Dongen
(Midden/Boven Eoceen)

Fig. 4.5 (Naar Letsch en Sissingh, 1983)

van Landen tegen de flanken van dit Hoog duidt op een relatief hoge ligging aan het eind van het Paleoceen (non-depositie en/of erosie). De eventuele gescheiden ontwikkeling van de Klei van Ieper in een noordelijk en zuidelijk bekken duidt op een voortduren van deze structurele opwelving. Als het Zand van Brussel deels een afzetting in een regressieve fase representeert, moet gezien de verbreiding en uniformiteit ervan toch reeds een substantiële daling van het Hoog zijn opgetreden. Een zekere primaire verdunning van het Zand van Brussel naar het Hoog toe is herkenbaar op kaarten en profielen (bijlagen 6, 7 en 15, 16). Vervolgens werd in een transgressieve fase de Klei van Asse afgezet.

Onder-oligocene erosiefase

Een belangrijke erosiefase vond plaats tijdens het Onder-Oligoceen (zie fig. 4.5) en resulteerde in grootschalige erosie van eocene en oudere afzettingen daar waar deze oudere afzettingen onder invloed van (zout) tektoniek omhoog gekomen waren of reeds (submarien) culminaties vormden.

Deze opheffing en erosie had vooral plaats in een WNW-OZO zone over Midden Nederland, ongeveer identiek aan de zone met de grootste opheffing aan het einde van het Krijt; vergelijk de figuren 4.5 en 4.6. Echter de smalle NW-ZO strook in dit gebied die aan het eind van het Krijt niet opgeheven werd, lijkt tijdens de onder-oligocene erosiefase wel relatief hoog gelegen te hebben. Met name het Kijkduin-Hoog werd in deze periode sterk opgeheven. De laat-eocene afzettingen (het Zand van Brussel en de Klei van Asse) werden hierdoor over grote delen van Nederland sterk in dikte gereduceerd of zelfs geheel afgeërodeerd; zie Fig. 4.5.

In de op de regressie/erosiefase volgende transgressieve fase werd de (onder-/)midden-oligocene Formatie van Rupel afgezet. Alleen in de provincie Limburg wordt de oudere, onder-oligocene Formatie van Tongeren aangetroffen. De Formatie van Rupel is onder te verdelen in een transgressief basiszand, dat arm aan fauna is: het Zand van Berg, en de Klei van Boom. De dikte van het Zand van Berg is het grootst nabij de paleokustzones en neemt bekkenwaarts af. In de

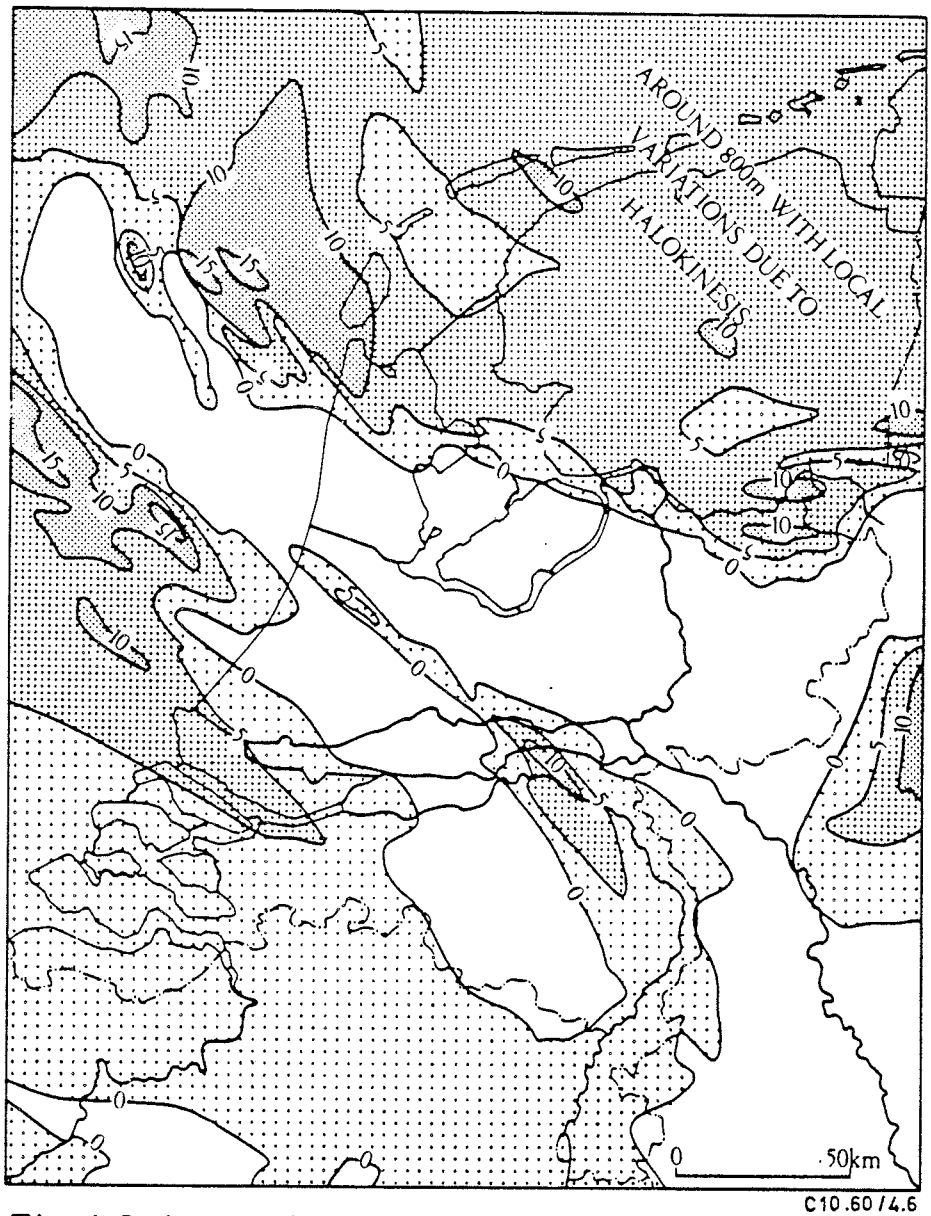


Fig. 4.6 Isopachenkaart van het Boven-Krijt (naar Heybroek, 1974)

paleokustzones ligt het Zand van Berg vaak direkt op de zandige top van de Klei van Asse ('Zand' van Asse). Deze twee eenheden zijn zowel lithologisch als door gebrek aan fauna slechts met de grootste moeite van elkaar te onderscheiden. De Klei van Boom is afgezet in een open marien milieu, met een waterdiepte van 100-150 m.
De plantenresten/bruinkool-inschakelingen in de Formatie van Rupel, die worden aangetroffen in het Peelgebied, duiden op een ligging van de paleokustlijn ter hoogte van de Duits/Nederlandse grens. De grote dikte in dit zelfde gebied maakt een kanteling van het sedimentatiebekken in ZO-richting waarschijnlijk. De formatie is zeer plaatselijk door de onder-miocene erosiefase sterk in dikte gereduceerd of zelfs geheel verdwenen.
Een regressieve fase beëindigde de afzetting van de Klei van Boom. Tijdens de hierop volgende sedimentatiecyclus werd de Formatie van Veldhoven afgezet. Ook deze formatie - in zijn meest complete verschijningsvorm het Zand van Voort en de Klei van Veldhoven omvattend - bereikt zijn grootste dikte in het zuidoosten van Nederland. Naar het noorden verdwijnt het transgressieve, basale Zand van Voort en gaat de klei domineren.
De Savische erosiefase, nabij de overgang Oligoceen-Mioceen (relateerbaar met een sterke zeespiegeldaling tijdens het Chattien), liet van deze formatie op veel plaatsen slechts erosieresten achter (bijv. in het gebied van Terschelling); in het Zuiderzeebekken en in zuidoostelijk Nederland lijkt de formatie echter nog grotendeels compleet aanwezig te zijn.

4.2.2. Neogeen

De afzettingsgeschiedenis van het Neogeen in Nederland hangt nauw samen met de ontwikkeling van de Benedenrijnse Bocht en het riviersysteem van de Rijn. De vier sedimentatiecycli in het Neogeen lijken dan ook deels met wereldwijde zeespiegelbewegingen en deels door middel van regionale (beperkte) tektoniek verklaarbaar te zijn.
De afzetting van de drie mariene formaties van boven-tertiaire en onder-kwartaire ouderdom manifesteerde zich in de tijd steeds sterker als een uitbouwend delta-fan systeem waar het huidige vasteland van Nederland uit voort zou komen.

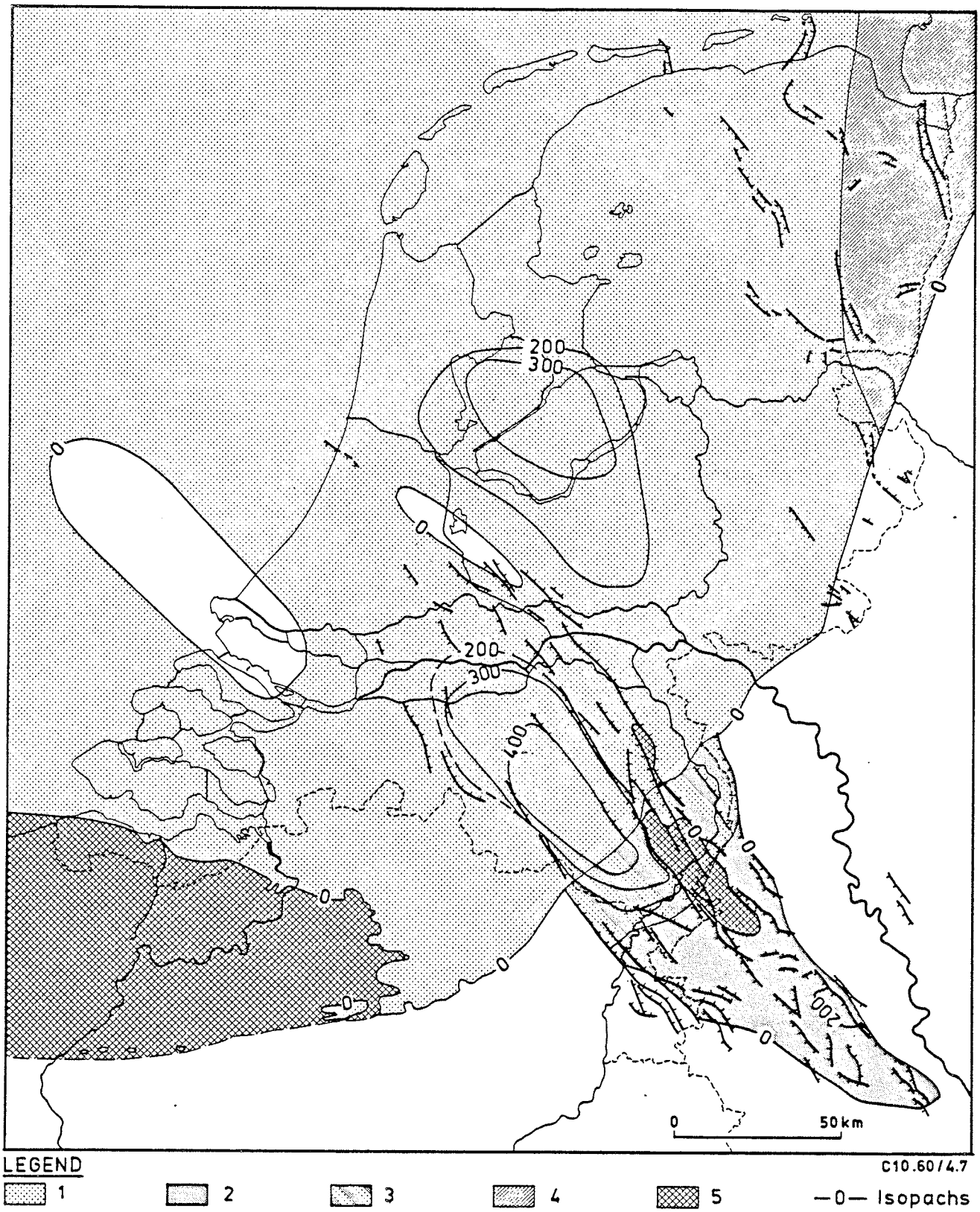


Fig. 4.7 Boven-Mioceen: isopachen en facies distributie-kaart (zones FC en Fi+Su) (Naar Zagwijn en Doppert, 1978)

1: mariene afzettingen
2: fluviatiele afzettingen
3: mariene afzettingen bedekt door fluviatiele afzettingen
4: mariene afzettingen bedekt door brakwater-afzettingen
5: Boven-Mioceen afwezig door erosie

De Formatie van Breda van miocene ouderdom valt onder te verdelen in twee afzettingsregimes. Eén in het zuiden van Nederland en wel het Centrale Slenkgebied waar in een, vermoedelijk ten dele geïsoleerd, bekken sedimenten afgezet werden, die deels verklaard kunnen worden met een transgressie die inzette na het Aquitanien, maar voor een belangrijk deel bepaald werden door een vrijwel continue synsedimentaire daling van het gebied van de Centrale Slenk. Dit resulteerde enerzijds in afzetting van (ondiep) mariene kleien en zanden, die van een relatief stijgend achterland in het zuidoosten aangevoerd werden, en anderzijds afzetting van paralische afzettingen, kenmerkend voor gebieden waar continue synsedimentaire daling optreedt; zie Fig. 4.7.

In het centrale en noordelijke deel van Nederland kan de Formatie van Breda in twee delen opgesplitst worden. Een basaal kleiïg deel afgezet in de transgressieve fase die van het Aquitanien tot het begin van het Tortonien wereldwijd plaatsvond. Uitgebreide bestudering van de mollusken en vertebraten fauna's van de Formatie van Breda in oostelijk Nederland door Van de Bosch, Cadée & Janssen (1975) leidde tot de conclusie dat het kleiïge basispakket een continu transgressief karakter heeft. Het bovenste deel van dit kleipakket bevat geen kalkhoudende fossielresten en geen benthonische fauna, wel worden vertebraten-resten aangetroffen. Hieruit zou de conclusie getrokken kunnen worden dat het hier om afzetting in een periode van relatieve zeespiegelstilstand gaat waarin stratificatie van de watermassa is opgetreden en zich euxinische omstandigheden ontwikkelden aan de bodem. De relatieve beperktheid van de regio waaruit de gegevens stammen, maakt het o.i. niet helemaal verantwoord zonder aanvullend onderzoek dit beeld voor geheel Centraal- en Noord-Nederland als maatgevend te accepteren, alhoewel sterke indicaties voor euxinische omstandigheden aanwezig zijn. Het bovenste deel van de formatie is vaak zandig ontwikkeld en representeert vermoedelijk de regressieve (Tortonien) Messinien-fase. Deze zanden worden alleen in de diepere delen van het afzettingsbekken aangetroffen en niet op de Hogen.

Aan het einde van het Mioceen ligt de paleokustlijn dicht bij de oostgrens van Nederland; zie Figuur 4.8.

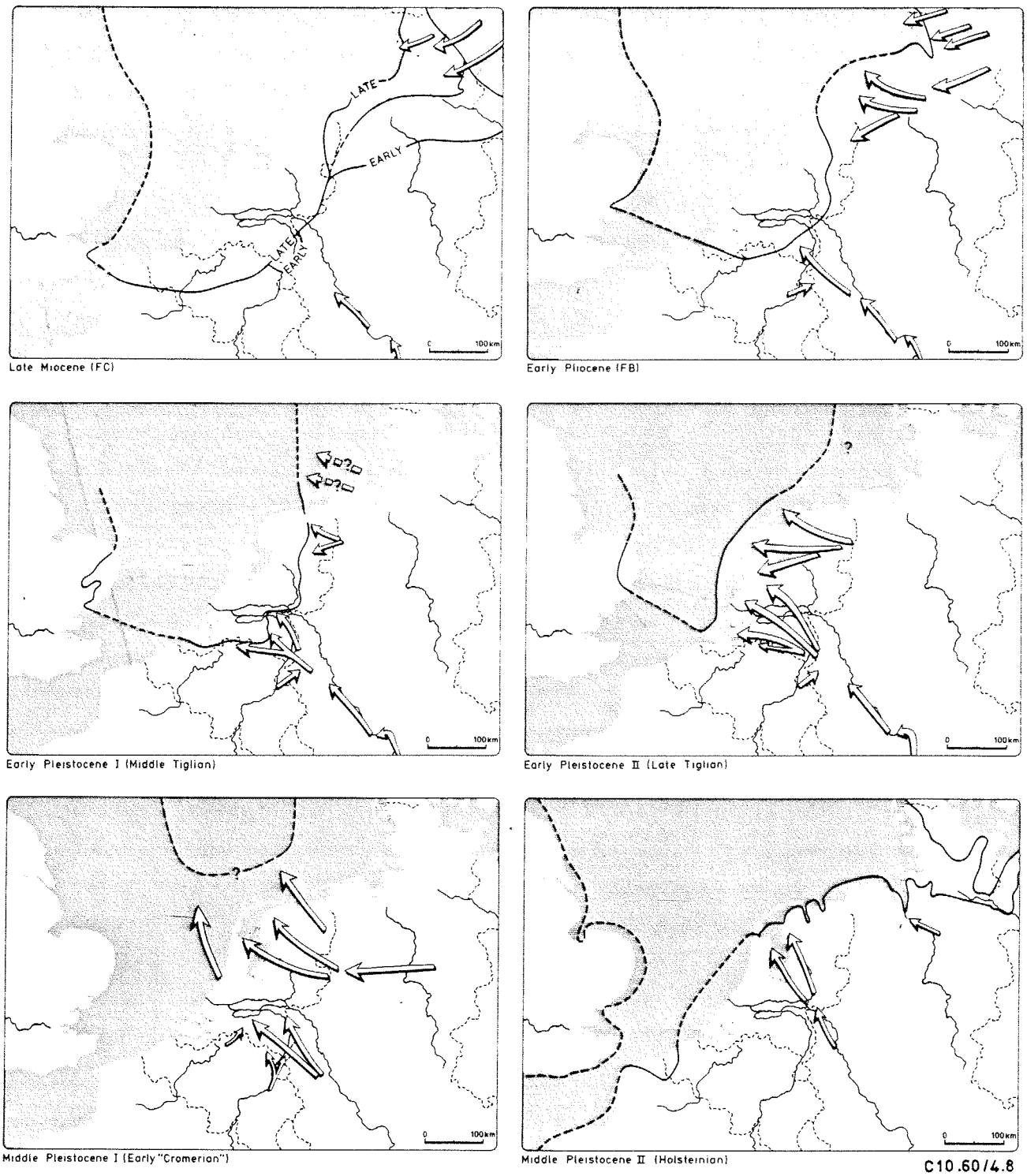


Fig. 4.8 Evolutie van de kustlijn en fluviatiele sedimentatie in de zuidelijke Noordzee en aangrenzende gebieden vanaf het Boven-Mioceen tot het Midden-Pleistoceen (Naar Zagwijn en Doppert, 1978)

Men kan concluderen dat in de transgressieve-regressieve opeenvolging van de miocene afzettingen in het Zuiderzee Bekken grofweg de wereldwijde zeespiegelbewegingen herkenbaar zijn, terwijl de miocene afzettingen in zuidoostelijk Nederland veel meer door lokale tektoniek (Beneden Rijnse Bocht) beïnvloed zijn.

De relatief dunne afzettingen van de Formatie van Breda in het westen en noordwesten van Nederland duiden op resp. verminderde sedimentatie en (sterke) erosie aan het eind van het Mioceen. Elders lijkt het hiaat geringer. In het Zuiderzee Bekken en in de Centrale Slenk lijkt een overgang zonder hiaat aanwezig te zijn van miocene naar pliocene afzettingen. De paleokustlijn van de pliocene zee lag reeds geheel noordelijk/westelijk van de huidige landsgrenzen; vooral langs de zuidelijke bekkenrand en langs grote delen van de oostelijke bekkenrand werden zeer schelprijke lagen afgezet, die naar hun engelse pendant de 'Coralline Crag' genoemd worden; zie Fig. 4.8. Zij maken deel uit van de Formatie van Oosterhout.

Over het algemeen bestaat de formatie uit ondiepe mariene en kustnabije afzettingen. Alleen in het noordwesten van Nederland is sprake van vol-mariene kleien.

In het noord- en zuidoosten van Nederland breidden verschillende riviersystemen zich uit en werden de kontinentale, deels fluviatiele, deels deltaïsche Formatie van Scheemda en Kiezeloöliet Formatie afgezet; zie Fig. 4.8. De relatief koude periode die, vergeleken met latere ijstijden, bovendien zeer lang duurde en bekend staat als het Praetiglien was vermoedelijk de oorzaak van een sterke zeespiegeldaling onder invloed van sterke vergroting van de ijskappen. Tijdens deze zeespiegeldaling trok de zee zich hoogstwaarschijnlijk grotendeels terug uit Nederland en vond erosie plaats van de Formatie van Oosterhout.

In het Vroeg-Pleistoceen (Midden-Tiglien) werd het N, W en centrale deel van Nederland echter weer door de zee bedekt en begon de afzetting van de mariene Formatie van Maassluis ; zie Fig. 4.8. Hierna zette een regressieve fase in die de paleokustlijn deed verschuiven vanaf zijn Midden-Tiglien positie tot ver buiten de huidige kustlijn in het Midden Pleistoceen; verg. Fig. 4.8. Met het terugtrekken van de zee bouwden grote delta-systemen van Rijn, Maas en oostelijke rivieren zich uit.

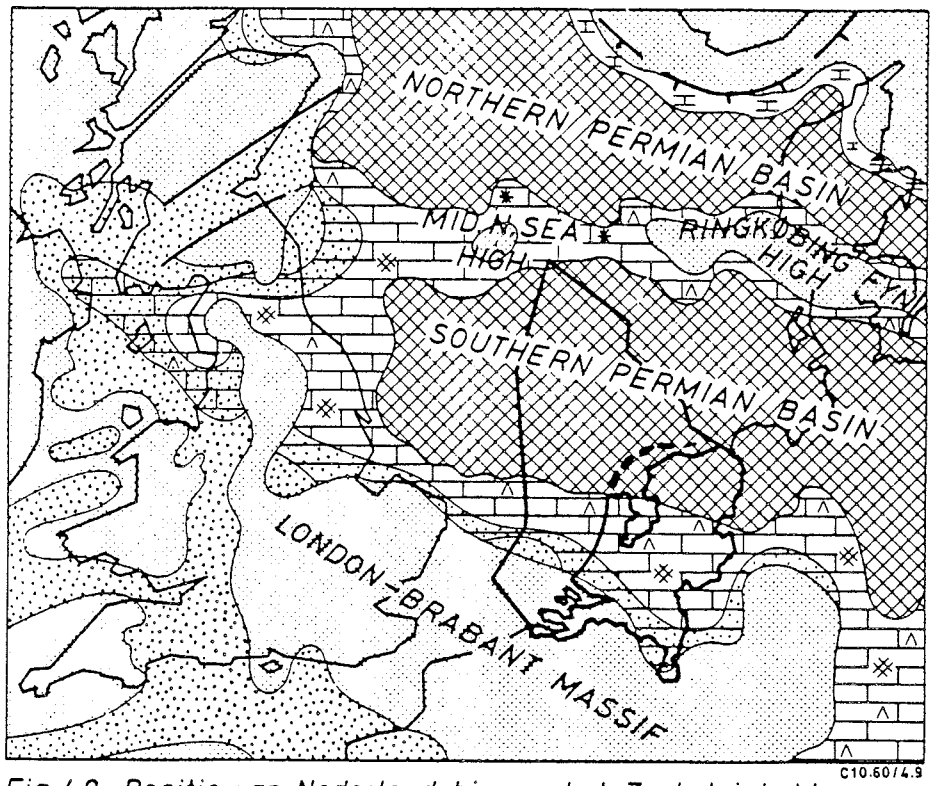


Fig. 4.9 Positie van Nederland binnen het Zechsteinbekken Paleogeografie voornamelijk naar Ziegler, 1975

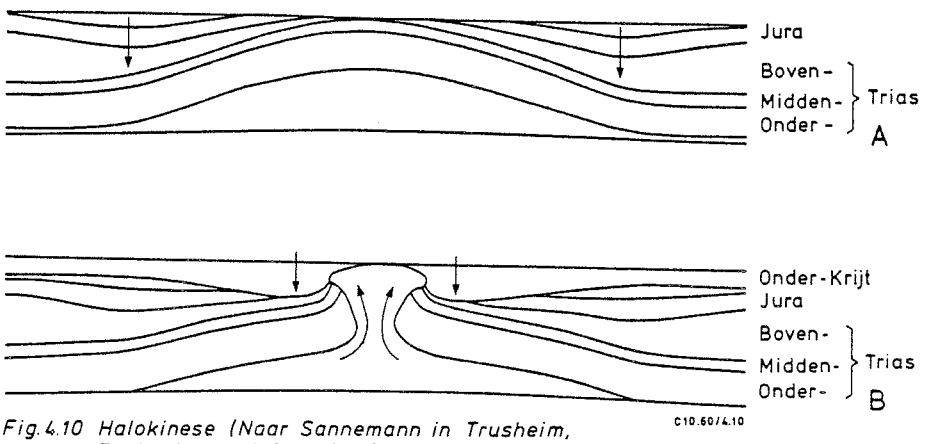


Fig. 4.10 Halokinese (Naar Sannemann in Trusheim, Zschr. deu. geol. Ges. 1957.)

Gedurende een beperkt aantal malen zouden er nog zeespiegelbewegingen optreden en bedekte de zee weer delen van Nederland, maar ruwweg kan gesteld worden dat vanaf het Pleistoceen kontinentale afzettingen gingen domineren en het vasteland van Nederland in zijn huidige vorm ontstond.

4.2.3 Zout en zouttektoniek in noordelijk Nederland

Tijdens de Zechstein periode (251-232 miljoen jaar B.P.) werd een groot deel van Nederland bedekt door de Zechstein zee, die in twee bekkens opgesplitst was; zie Fig. 4.9.
Alleen in de centrale delen van deze bekkens werden dikke lagen zout afgezet. Fig. 4.9 laat zien dat vooral in de noordelijke provincies zout-afzettingen plaatsvonden in het Southern Permian Basin. De verschillende Zechsteincycli lieten een vele honderden meters dik zoutpakket achter. Aan het begin van de Trias verandert het afzettingsregiem in NW Europa en worden de zoutpakketten afgedekt door zanden en kleien (Van Adrichem Boogaert et al. 1983).

Zout is 'temperamentvol' in zijn snelle reactie op veranderingen in de fysische omstandigheden in de loop van zijn geologisch bestaan en reageert uitermate levendig en beweeglijk op tektonische spanningen. Het heeft een eigen 'zouttektoniek', of halokinese (Thiadens, 1968). Vanaf het moment van bedekt raken door klastische sedimenten in de Trias tot op heden is het zout alleen al door bedekking onderhevig geweest aan voortdurend veranderende (in grote lijnen toenemende) belasting. Daarnaast hebben vele regionaal aangrijpende tektonische fasen hun invloed uitgeoefend op NW-Europa.
Resultaat van de variërende belastings- en spanningsregimes is het plastisch reageren (vloeien) van het zout. Het relatief lichte zout tracht in evenwicht te geraken met de omringende gesteentepakketten vanaf het moment dat het (labiele) evenwicht van paralelle gelaagdheid verstoord is. Soms resulteert dit in de vorming van zoutkussens, plaatselijk sterk verdikte zoutvoorkomens die echter niet door het bovenliggende sediment breken; op andere plaatsen resulteert dit in de vorming van diapiere structuren en breekt het zout wel door de bovenliggende sedimenten heen; zie Fig. 4.10. In het laatste geval

komt het zout via zwakke plekken in de bovenliggende gesteentelagen (meestal breukzones) omhoog, vaak in de vorm van zoutruggen, -dômes of -pijlers. Als dit proces eenmaal begonnen is blijkt de stijgkracht van het zout vaak voldoende om bovenliggende sedimenten te plooien, te breken, op te tillen of te penetreren.
In het noordoosten van Nederland treden dan ook een aantal verschijnselen binnen het Tertiair en Kwartair op onder invloed van halokinese. Op sommige plaatsen zijn de afzettingen sterk geplooid zonder doorboord te zijn. Bij Anlo daarentegen vinden we geen tertiaire afzettingen meer maar slechts sedimenten uit het Kwartair; hier heeft een doorboring van het Tertiair plaatsgevonden.
Uit de profielen en kaarten valt af te leiden dat het omhoogkomen van het zout niet overal gelijktijdig heeft plaatsgevonden. Op sommige plaatsen lijkt het zout tot rust gekomen en zijn de jongtertiaire en kwartaire afzettingen niet meer geplooid onder invloed van het stijgende zout, op andere plaatsen is aan het oppervlak een lichte verhoging in het veld waar te nemen; dit duidt erop dat de beweging van het zout tot op de dag van vandaag vermoedelijk doorzet (bijvoorbeeld bij Schoonlo).

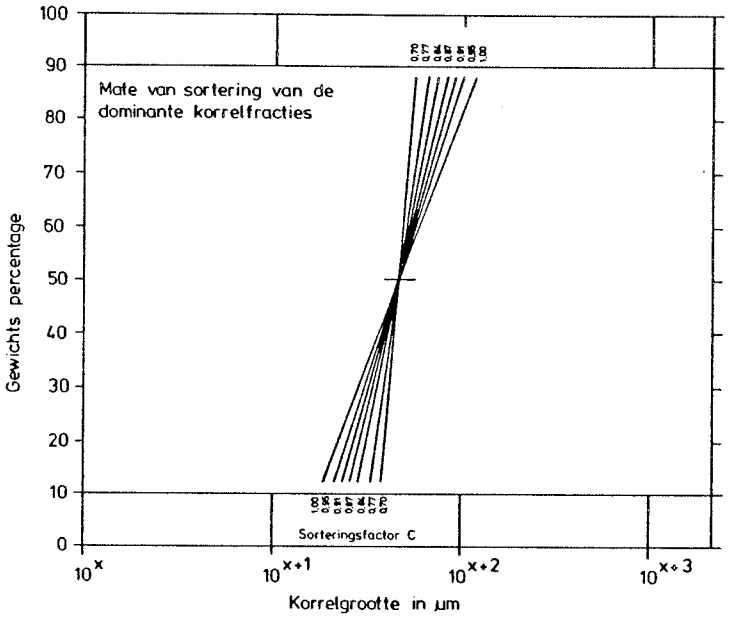
4.3 Karakterisering van reservoirzanden

Een reservoirgesteente bestaat uit gesteentemateriaal met dusdanige porositeits- en permeabiliteitseigenschappen, dat berging en stroming van vloeistoffen (en gassen) in het gesteente mogelijk is (in: Visser et al., 1980). Een reservoirgesteente komt in aanmerking voor opslag van warmte indien het aan de bovenzijde, en bij voorkeur tevens aan de onderzijde, is afgesloten door hydraulisch slecht doorlatende en thermisch slecht geleidende lagen. Voor de onttrekking van aardwarmte is dit criterium van minder belang.

Tertiaire en onder-kwartaire gesteenten die goede reservoireigenschappen hebben bestaan in Nederland vrijwel altijd uit ongeconsolideerde of in geringe mate geconsolideerde, zandige afzettingen. De afzettingen zijn opgebouwd uit zandige lagen met variërende dikten; vaak zijn tussen de zandige lagen kleiïge laagjes aanwezig. Afzettingen waarvan de zandige lagen zijn opgebouwd uit redelijk tot goed gesorteerd materiaal (verg. Fig. 4.11) hebben veelal goede reser-

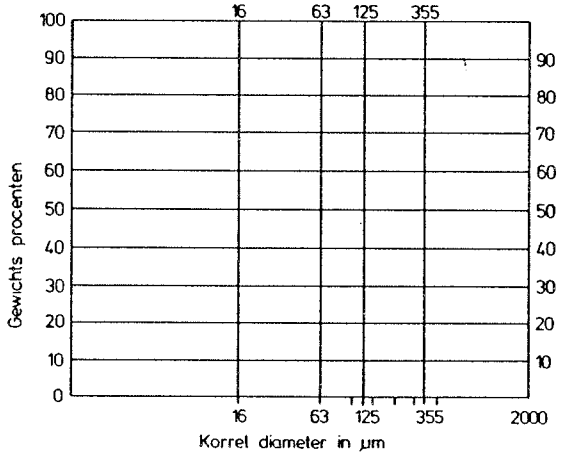
voireigenschappen en zijn in principe het meest geschikt voor opslag of winning van warmte. De aanwezigheid van klei en fijn silt in een laag die overigens overwegend bestaat uit zandig materiaal beïnvloedt de permeabiliteitseigenschappen ervan nadelig (verg. o.m. Speelman & Breunese, 1985) en kan aanleiding geven tot technische problemen, zoals verstoppingen.
De dikte van een reservoirgesteente is één van de bepalende factoren met betrekking tot de hoeveelheid warmte die in een (segment van een) reservoirgesteente kan worden opgeslagen, dan wel daaraan kan worden onttrokken. Voor opslag van warmte komen in de praktijk zandige afzettingen met een dikte van globaal 10 tot 50 m in aanmerking. De optimale dikte is onder meer afhankelijk van de hoeveelheid warm water die dient te worden opgeslagen. Bij winning van lage temperatuur-aardwarmte is er uiteraard in principe geen maximum aan de reservoir-dikte.
Bij opslag van warmte is de diepteligging van het reservoirgesteente grotendeels bepalend voor het maximaal toelaatbare temperatuurniveau van het te accumuleren warme water (verg. paragraaf 1.3). De maximum-diepte waarop water met een bepaald temperatuurniveau kan worden opgeslagen, wordt vooral bepaald door economische factoren. Bij winning van aardwarmte is de diepteligging van een reservoirgesteente met name bepalend voor het temperatuurniveau van het grondwater dat er aan kan worden onttrokken (paragraaf 2.1).
Naast de dikte en diepteligging van reservoirgesteenten is ook de laterale uitgestrektheid ervan van belang. Een reservoirgesteente met een laterale verbreiding van een kilometer kan in de praktijk probleemloos fungeren als opslagmedium voor verschillende warmteopslagsystemen, of als warmtebron voor aardwarmtewinning.

De hoeveelheid energie die nodig is om water (met bepaalde eigenschappen) aan een reservoirgesteente te onttrekken, dan wel daarin te injecteren, neemt toe naarmate de permeabiliteit van het gesteente afneemt (paragraaf 1.3). Dit betekent dat de gemiddelde waarde van de permeabiliteit van de zandige lagen waaruit een reservoirgesteente is opgebouwd, boven een zeker minimum dient te liggen. Dit minimum hangt onder meer af van de grootte van de te realiseren massastroom en van de temperatuur van het water dat wordt opgeslagen in, dan wel onttrokken aan, het reservoirgesteente. Verder is de

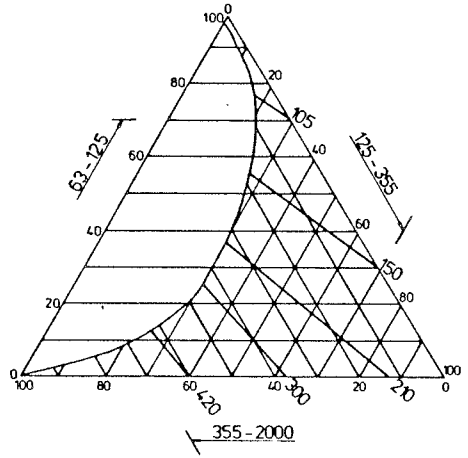


Mate van sortering van de dominante korrelfracties	Sorteringsfactor (C)
buitengewoon goed tot zeer goed	0,70
zeer goed tot goed	0,77
goed	0,84
goed tot matig	0,87
matig	0,91
matig tot slecht	0,95
slecht	1,00

Indeling van korrelgrootteverdelingen in klassen van sortering van de dominante korrelfractie en daaraan gerelateerde waarden voor de sorteringsfactor, methode van Baaren, 1978



63 - 106 µm uiterst fijn
106 - 150 µm zeer fijn
150 - 212 µm matig fijn
212 - 300 µm matig grof
300 - 425 µm zeer grof
425 - 2000µm uiterst grof



Classificatie driehoek voor zand (in µm)

Fig. 4.11 Gebruikte classificatie - tabellen en - diagrammen voor korrelgrootte en sortering

C10 60 / 4.11

minimum-waarde uiteraard afhankelijk van het rendement dat om economische redenen tenminste gerealiseerd moet worden. Om deze redenen is het niet mogelijk een algemeen geldende minimum-waarde voor de gemiddelde permeabiliteit te geven. Als orde van grootte voor de minimum-waarde kan de door Despois & Nougarède (1979) opgegeven waarde van ca. 0,25 μm^2 (verg. paragraaf 2.2) worden gehanteerd. Net als in het geval van een minimum-waarde kan ook geen algemeen geldend maximum voor de waarde van de gemiddelde permeabiliteit worden vastgesteld. Bij opslag van warmte kan een hoge gemiddelde permeabiliteit in met name verticale richting een in sterke mate rendementsverlagend effect hebben. Maximum-waarden voor de gemiddelde permeabiliteit bij een reservoir-dikte van ca. 25 m liggen volgens Hellström et al. (1979) bij temperatuurniveaus van ca. 60, 90 en 120°C in de orde van grootte van respectievelijk ca. 8, 3 en 2 μm^2.
Bij winning van lage temperatuur-aardwarmte is een hoge waarde voor de gemiddelde permeabiliteit in principe gunstig.
Voor wat betreft de porositeitseigenschappen van reservoirgesteenten kan gesteld worden dat deze in het algemeen gunstig voor opslag en winning van warmte zullen zijn, indien de permeabiliteitseigenschappen van het reservoirzand aan de bovengestelde voorwaarden voldoen. Alle thans beschikbare gegevens betreffende de permeabiliteit en de porositeit van tertiaire en onder-kwartaire afzettingen in Nederland zijn vermeld in een compilatierapport dat in het kader van dit onderzoek is samengesteld (Speelman & Breunese, 1985).

Met name bij opslag van warmte dient het reservoirgesteente aan de bovenzijde, en bij voorkeur tevens aan de onderzijde, afgesloten te zijn door hydraulisch slecht doorlatende en thermisch slecht geleidende lagen. Onder Nederlandse omstandigheden zullen vrijwel zonder uitzondering kleilagen, of kleilagencomplexen, fungeren als afsluitende lagen. Het is niet mogelijk om algemeen geldende minimum-waarden voor de dikten en de hydraulische weerstanden van de afsluitende lagen te geven. De benodigde weerstand hangt onder meer af van het temperatuurniveau van het te accumuleren water, de duur van de warmte-opslag en van de drukken die heersen in het reservoirgesteente en de daarboven en onderliggende afzettingen. Bij seizoenale opslag en temperatuurniveaus tot ongeveer 120°C zullen goed gecom-

Zand van Heers

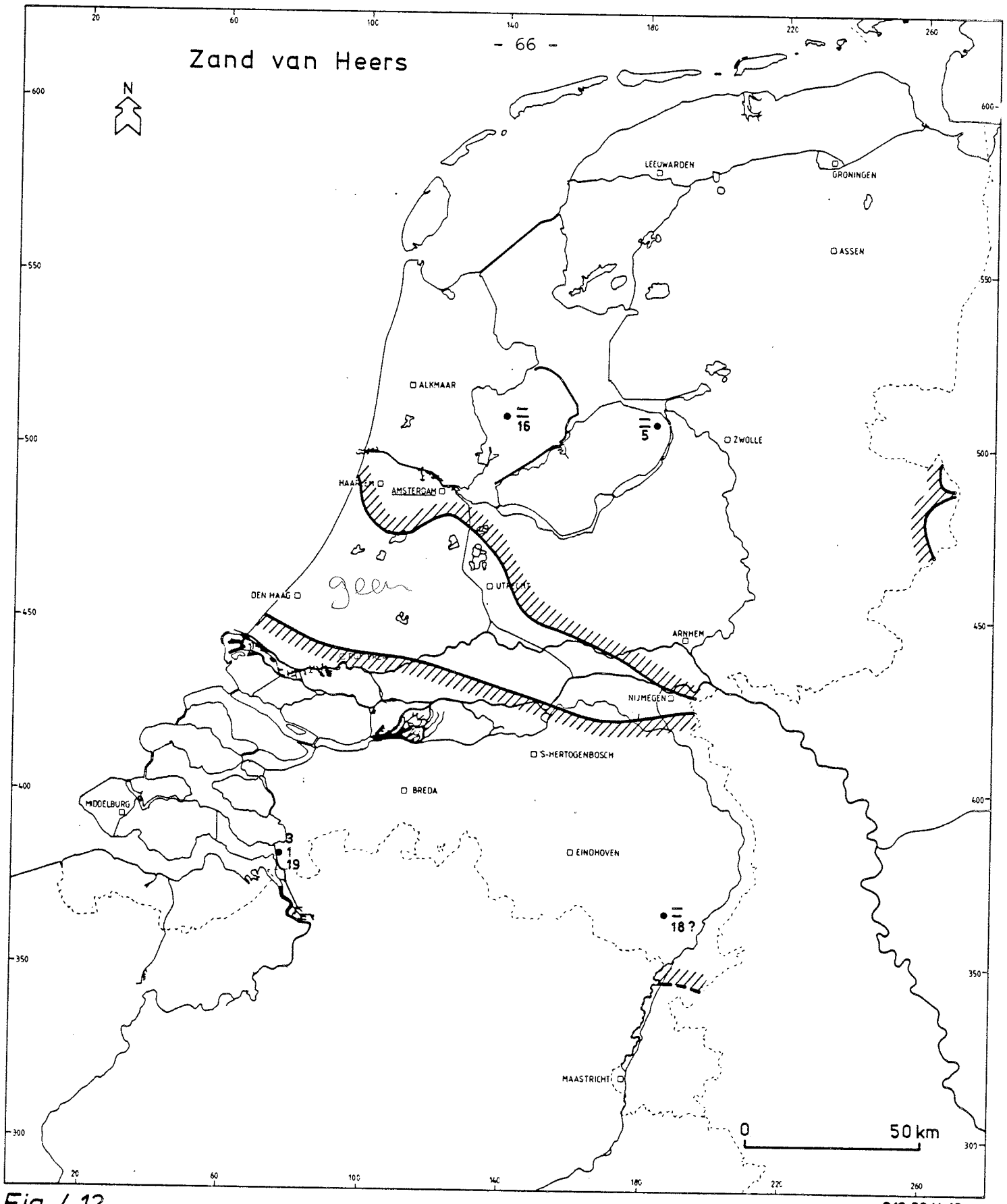


Fig. 4.12

C10.60/4.12

Korrelgrootte

1. 63 - 106 uiterst fijn
2. 106 - 150 zeer fijn
3. 150 - 212 matig fijn
4. 212 - 300 matig grof
5. 300 - 425 zeer grof
6. 425 - 2000 uiterst grof

Sortering

7. buitengewoon-zeer goed
6. zeer goed-goed
5. goed
4. goed-matig
3. matig
2. matig-slecht
1. slecht

Volumegehalte klei

5 = V_{cl} (<16 µm) in %

Voorbeeld:

3 Korrelgrootte
5• Sortering
35-10-15 Volumegehalte klei
B M T Basis ⟶ Top

pacteerde kleilagen met een homogene samenstelling en een dikte van tenminste ca. 5 meter vermoedelijk een voldoende hoge hydraulische weerstand hebben. Bij hogere temperaturen is een grotere dikte noodzakelijk. De hydraulische weerstand en dikte van kleilagen die het reservoirgesteente aan de onderzijde afsluiten is minder kritisch. Wat betreft de laterale verbreiding van de afsluitende lagen geldt dat die tenminste zo groot moet zijn als de laterale uitgestrektheid van het gedeelte van het reservoirgesteente waarin warmte wordt opgeslagen.

Afzettingen die water bevatten met een gering gehalte aan opgeloste stoffen - d.w.z. zoet water - zijn in principe te prefereren voor toepassingen op het gebied van warmte-opslag en warmtewinning. Vorming van chemische neerslagen of het optreden van corrosie zijn bij gebruik van zoet water vrij eenvoudig te voorkomen. Bij gebruik van afzettingen die water bevatten met bijvoorbeeld een hoog calcium- of chloridegehalte is de kans op problemen bij de bedrijfsvoering van systemen voor warmte-opslag of aardwarmtewinning aanzienlijk groter. Indien de technische voorzieningen aan het gebruik van water met een hoge hardheid of zout grondwater zijn aangepast, zijn neerslagvorming en corrosie echter in principe (goeddeels) te voorkomen. Bij gebruik van brak of zout grondwater is in principe gewaarborgd dat de opslag van warmte, of aardwarmtewinning, geen negatieve effecten zullen hebben op de belangen van gebruikers van zoet grondwater (vergelijk ook Olsthoorn, 1983).

4.4 Beschrijving van de tertiaire en onder-kwartaire reservoirzanden

4.4.1 Zand van Heers

Het Zand van Heers komt in de ondergrond van Nederland voornamelijk ten zuiden van het Mid Nederland Hoog voor, met uitzondering van Zuid-Limburg. Ten noorden van het Mid Nederland Hoog komt het zeer plaatselijk voor; zie Fig.4.12.

De eenheid ligt op een diepte variërend van 400 m in Zeeuws-Vlaanderen tot ca. 1500 - 2000 m in de Centrale Slenk. Op de Peelhorst - ten oosten van de Centrale Slenk - ligt het Zand van Heers aanmerkelijk minder diep, op ca. 500 tot 600 m. Ten noorden van het Mid

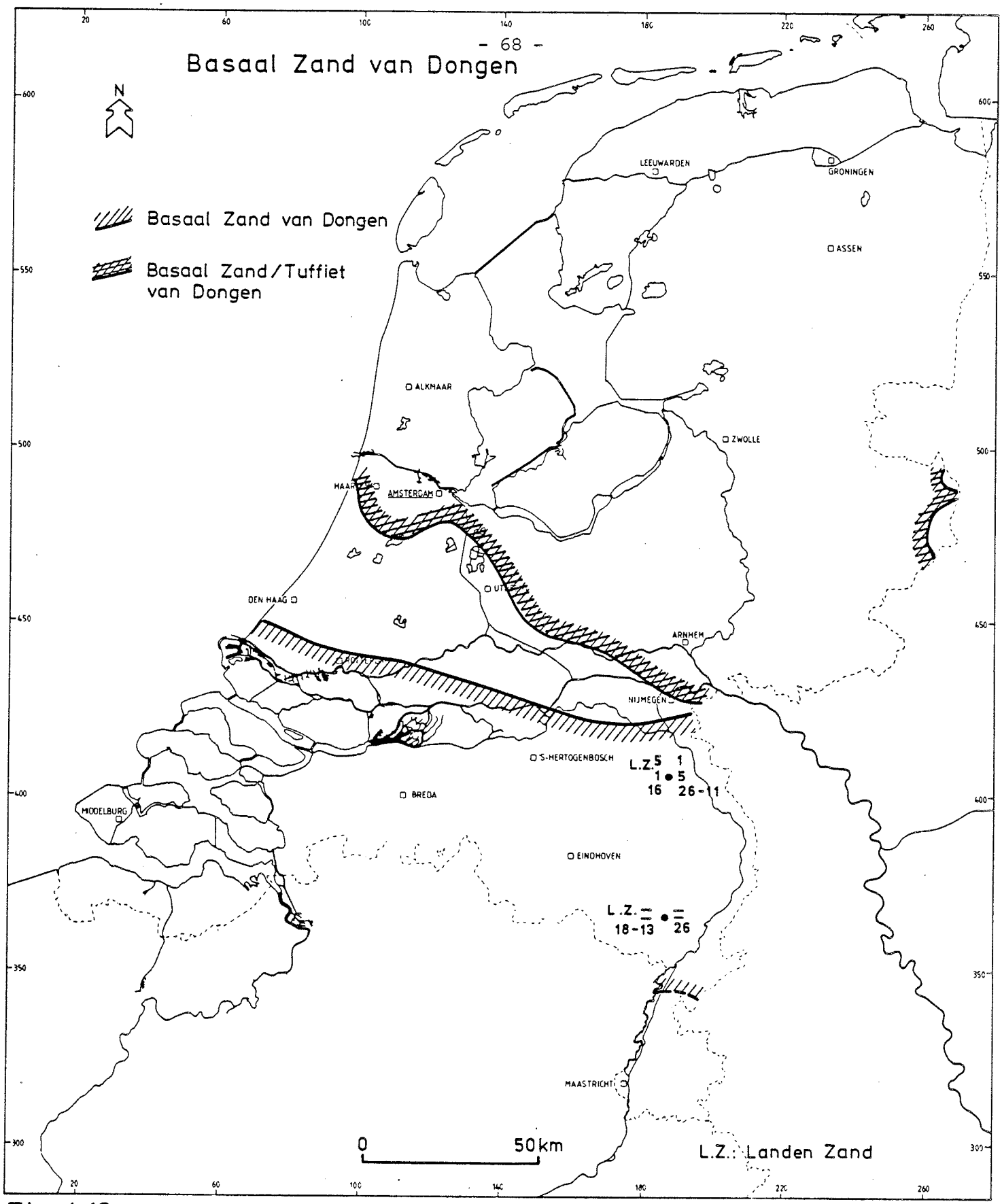


Fig. 4.13

C10.60/4.13

Korrelgrootte

1 63 - 106 uiterst fijn
2 106 - 150 zeer fijn
3 150 - 212 matig fijn
4 212 - 300 matig grof
5 300 - 425 zeer grof
6 425 - 2000 uiterst grof

Sortering

7 buitengewoon-zeer goed
6 zeer goed-goed
5 goed
4 goed-matig
3 matig
2 matig-slecht
1 slecht

Volumegehalte klei

5 = V_{cl} (<16µm) in %

Voorbeeld:

3 Korrelgrootte
5 • Sortering
35-10-15 Volumegehalte klei
B M T Basis ⟶ Top

Nederland Hoog varieert de diepteligging van ca. 50 tot maximaal ca. 1550 m; zie bijlage 4.
In Zeeland en in het zuiden van Noord-Brabant bereikt het Zand van Heers maximaal een dikte van ca. 20 m. Deze neemt naar het noorden af tot enkele meters. De afzetting bereikt zijn grootste dikte van ca. 30 m op de Peelhorst. Ten noorden van het Mid Nederland Hoog is de dikte van het Zand van Heers, waar aanwezig, meestal 10 m of minder. Zeer lokaal loopt het op tot ca. 25 m. Zowel in het zuidelijk als in het noordelijk verbreidingsgebied wigt het Zand van Heers snel uit tegen het Mid Nederland Hoog.
Het Zand van Heers is een fijn tot matig fijn zand met waarschijnlijk overwegend een slechte sortering. De zanden zijn deels tot kalkzandsteen verhard. Het gehalte aan klei en fijn silt is nogal wisselend. In de omgeving van Woensdrecht bedraagt het klei- en fijn siltgehalte ongeveer 0,2.
De relatief hoge gehalten aan klei en fijn silt duiden erop dat het Zand van Heers overwegend een lage permeabiliteit heeft. De weinige beschikbare meetgegevens zijn hiermee in overeenstemming. De permeabiliteit bedraagt waarschijnlijk gemiddeld minder dan 0,1 μm^2.
Het Zand van Heers wordt in het gehele voorkomensgebied afgedekt door een goed afsluitend kleipakket: de Klei van Landen. De dikte ervan varieert van ca. 10 tot 70 m.

Op basis van de beschikbare gegevens kan geconcludeerd worden dat het Zand van Heers niet of nauwelijks in aanmerking komt als reservoirgesteente voor grootschalige opslag van warmte en voor lage temperatuur-aardwarmtewinning.

4.4.2 Basaal Zand van Dongen

Het Basaal Zand van Dongen komt voor in de ondergrond van vrijwel geheel Nederland, met uitzondering van Zuid-Limburg, het Mid Nederland Hoog en Oost-Twente; zie Fig. 4.13.
De diepteligging van deze afzetting varieert in het zuidelijke verbreidingsgebied van ca. 400 m in Zeeland tot ca. 1000 à 1800 m in de Centrale Slenk (bijlage 5). De afzetting ligt op de Peelhorst op 375 tot 500 m diepte. Ten noorden van het Mid Nederland Hoog bedraagt de diepteligging van het Basaal Zand van Dongen ca. 600 tot 1350 m.

In zuidwest-Nederland heeft het Basaal Zand van Dongen een dikte van 15 tot 20 m, terwijl ten zuidoosten van de lijn Tilburg-Den Bosch de dikte van de afzetting toeneemt van 20 tot ruim 100 m. Tegen de zuid- en noordflank van het Mid Nederland Hoog neemt de dikte van het Basaal Zand van Dongen snel af. In het zuidwesten van het IJsselmeergebied en in Noord-Holland bedraagt de dikte 5 tot 15 m. In Oost-Flevoland, Noordwest- en Midden Overijssel en het noordelijk deel van de Veluwe bedraagt de dikte 15 tot 30 m. Het Basaal Zand van Dongen heeft in de noordelijke provincies en het Waddengebied een dikte van ongeveer 10 tot 20 m.

In het zuidwesten van Nederland is het Basaal Zand van Dongen een uiterst fijn, humeus zand. Ten zuidoosten van de lijn Tilburg-Den Bosch vertoont het zandpakket een ander karakter. De zanden zijn zeer fijn en de korrelgrootte neemt naar de top toe. Mogelijk zijn er inschakelingen met zeer grof zand. De sortering van de zanden varieert sterk, van goed tot slecht. Het gehalte aan klei en fijn silt is in dit deel van het voorkomensgebied relatief laag, tevens is er een afname in klei- en fijn siltgehalte naar de top van het zandpakket. Op de Peelhorst bevat het Basaal Zand van Dongen zandsteeninschakelingen. Ten noorden van het Mid Nederland Hoog bestaat het Basaal Zand van Dongen uit zeer zandige kleien tot zeer kleiïge zanden met veel tufinschakelingen.

Het hoge gehalte aan klei en fijn silt in het grootste gedeelte van het voorkomensgebied duidt erop dat de afzetting overwegend een lage permeabiliteit heeft. De weinige beschikbare meetgegevens zijn hiermee in overeenstemming. De permeabiliteit bedraagt in het grootste gedeelte van het voorkomensgebied waarschijnlijk gemiddeld minder dan 0,1 μm^2. Een uitzondering hierop vormt de zone globaal ten zuidoosten van de lijn Tilburg-Den Bosch, waar de klei veelal geconcentreerd is in laagjes. De permeabiliteit van het Basaal Zand van Dongen bereikt in deze regio plaatselijk waarden van tenminste ca. 0,5 μm^2.

Het Basaal Zand van Dongen wordt in het grootste gedeelte van het voorkomensgebied afgedekt door een 100 tot 300m dik kleipakket: de Klei van Ieper. In het zuiden en zuidoosten van de Centrale Slenk, op een gedeelte van de Peelhorst (ten zuidoosten van Veghel) wordt

het Basaal Zand van Dongen bedekt door het Zand van Berg; zie paragraaf 4.4.5.

Op basis van de beschikbare gegevens kan geconcludeerd worden dat het Basaal Zand van Dongen alleen in de zone globaal ten zuiden van de lijn Tilburg-Den Bosch in aanmerking komt als reservoirgesteente voor grootschalige opslag van warmte en voor aardwarmtewinning. Gezien o.m. de diepteligging van de afzettingen in dit gebied is lage temperatuur-aardwarmtewinning de meest reëele mogelijkheid.

4.4.3 Zand van Brussel

Het Zand van Brussel komt voor in de ondergrond van zuidwest-Nederland en ten noorden van de lijn Den Helder-Amersfoort-Enschede, met uitzondering van Oost-Twente; zie Fig. 4.14.
In het zuiden van Zeeland ligt de top van de afzetting op ca. 100 m diepte en noordwaarts in de Voorne Trog op ca. 700m diepte. In het noordelijke verbreidingsgebied, ten noorden van het Mid Nederland Hoog, neemt de diepte tot de top van het Zand van Brussel af van ca. 1150 m in Oost-Flevoland en op de Veluwe tot nihil in Twente en ca. 300 m lokaal in Groningen en Drente (bijlage 6).
In het zuidwesten van Nederland heeft het Zand van Brussel een maximale dikte van ca. 125 m in de omgeving van Roosendaal; zuidwestwaarts neemt de dikte af tot 50 à 60 m. Langs de noord- en oostgrens van het zuidelijke verbreidingsgebied neemt de dikte van het Zand van Brussel zeer snel af van 80 m tot nihil. Ten noordoosten van het Mid Nederland Hoog en ten westen van Oost- Twente loopt de dikte op van nihil tot 30 m op de Veluwe en tot 80 à 90 m in de omgeving van de Noordoostpolder. In Oostelijk-Flevoland is het Zand van Brussel lokaal afwezig. Bij Hardenberg (Overijssel) loopt de dikte op tot 135 m. In de noordelijke provincies en het Waddengebied bedraagt de dikte 80 tot 100 m; in gebieden waar zouttektoniek heeft plaatsgevonden varieert de dikte tussen nihil en 100 m; zie bijlage 7.
Het Zand van Brussel is een uiterst fijn zand. Vooral in het bovenste deel worden talrijke kalk-/zandsteenbankjes aangetroffen; in de Achterhoek en in Twente bevat de top tevens schelpmateriaal. De zanden zijn in het algemeen matig gesorteerd. Het gehalte aan klei en fijn silt varieert sterk en neemt naar de basis en vaak tevens

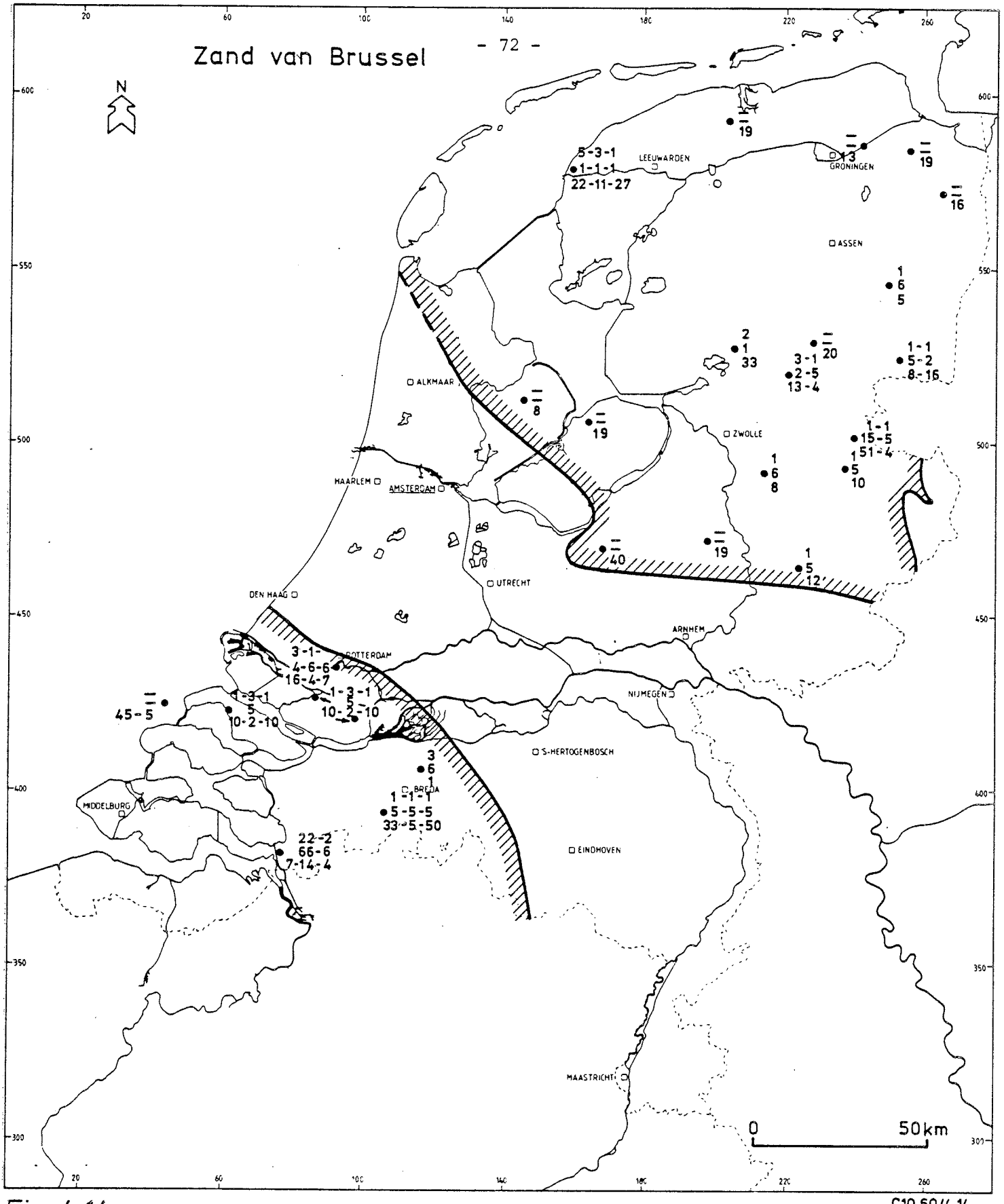


Fig. 4.14

C10.60/4.14

Korrelgrootte

1	63 - 106		uiterst fijn
2	106 - 150		zeer fijn
3	150 - 212		matig fijn
4	212 - 300		matig grof
5	300 - 425		zeer grof
6	425 - 2000		uiterst grof

Sortering

7	buitengewoon-zeer goed
6	zeer goed-goed
5	goed
4	goed-matig
3	matig
2	matig-slecht
1	slecht

Volumegehalte klei

5 = V_{cl} (<16µm) in %

Voorbeeld:

3	Korrelgrootte
5	Sortering
35-10-15	Volumegehalte klei
B M T	Basis → Top

naar de top van het zandpakket toe. In het zuidelijke verbreidingsgebied is de klei veelal homogeen binnen de eenheid verdeeld; in het noordelijke verbreidingsgebied is het vooral in discrete niveaus geconcentreerd. Opvallend is een 5 à 10 m dikke laag, bestaande uit relatief grof zand, met een aanzienlijk lager gehalte aan klei en fijn silt op ongeveer éénderde van de top van het pakket. Deze laag komt voor in de omgeving van Spijkenisse, Overflakkee en Strijen. Het gehalte aan klei en fijn silt in deze laag bedraagt ca. 0,02 en in de top en basis 0,10.
De enkele lagen binnen het Zand van Brussel die bestaan uit fijne zanden met een gehalte aan klei en fijn silt van slechts enkele procenten hebben een permeabiliteit in de orde van 0,2 tot 0,6 μm^2. De permeabiliteit van het grotendeels zeer kleirijke Zand van Brussel ligt echter aanzienlijk lager, en wel in de orde van 0,05 μm^2.
Het Zand van Brussel wordt in het gehele voorkomensgebied afgedekt door de Klei van Asse, met uitzondering van gebieden waar de top van het Zand van Brussel is afgeërodeerd; zie bijlage 6. Daar wordt het Zand van Brussel bedekt door het Zand van Berg (paragraaf 4.4.5). In zones waar zouttektoniek heeft plaatsgevonden wordt het Zand van Brussel soms bedekt door de Formatie van Breda (paragraaf 4.4.7). In het zuidwesten van Nederland bedraagt de dikte van de Klei van Asse 30-160 m. In het noordelijke verbreidingsgebied varieert de dikte van het kleipakket van minimaal 5-20 m op de Veluwe tot maximaal ca. 150 m in het noorden van Nederland.

Op basis van de beschikbare gegevens kan geconcludeerd worden dat uitsluitend de minst kleiïge lagen binnen het Zand van Brussel in aanmerking komen als reservoirgesteente, en wel in eerste instantie voor lage temperatuur-aardwarmtewinning.

4.4.4 Complex van Kallo

De afzettingen van het Complex van Kallo komen alleen voor in Zeeland, op de Zuidhollandse eilanden en in het uiterste westen van Noord-Brabant; zie Fig. 4.15.
De top van het complex ligt in zuidelijk Zeeland op 50 m diepte, naar het noorden op de Zuidhollandse eilanden neemt de diepte toe tot 500 m. De dikte van de eenheid is in het zuidwesten van Noord-

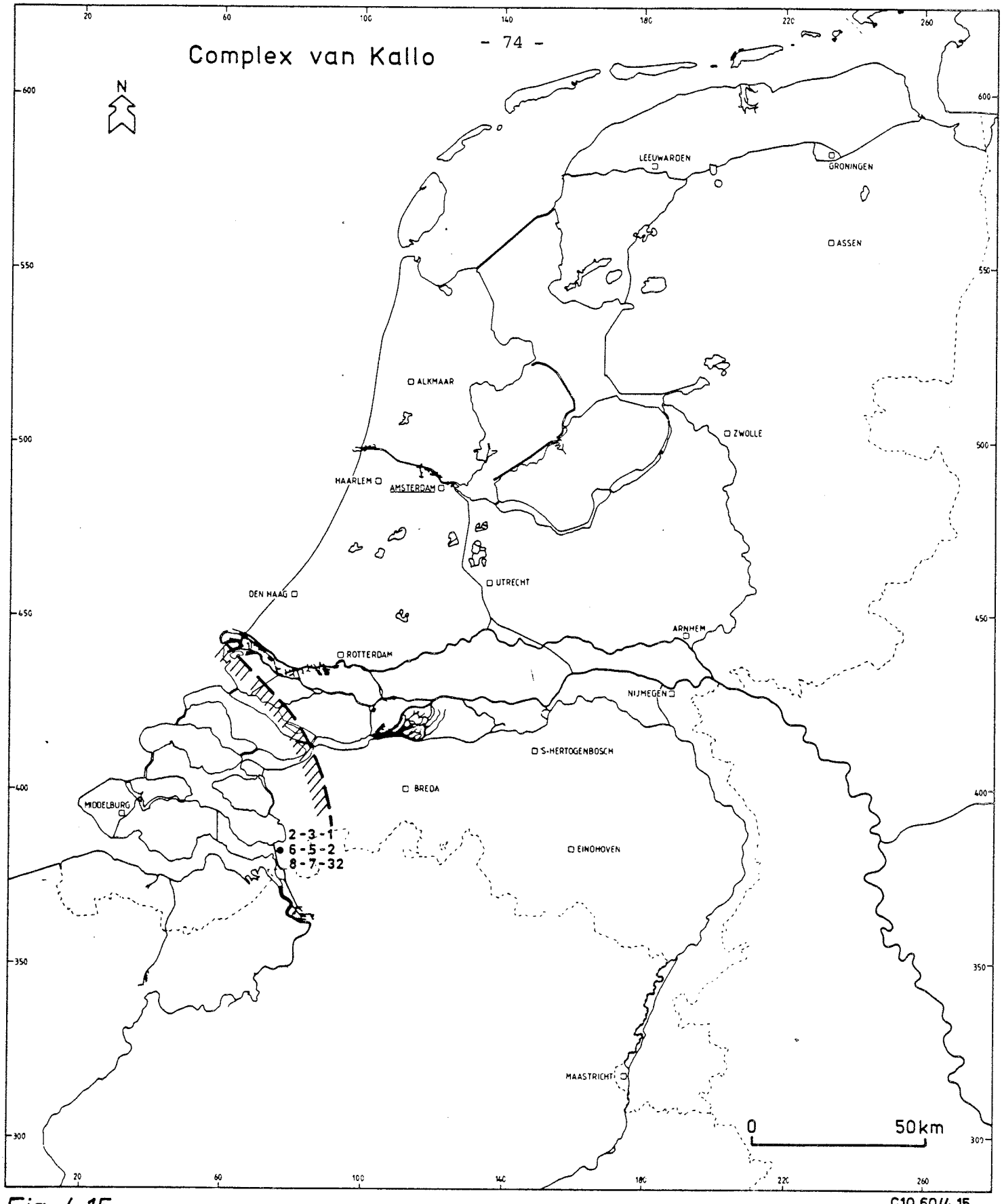


Fig. 4.15

C10.60/4.15

Korrelgrootte			
1	63 - 106		uiterst fijn
2	106 - 150		zeer fijn
3	150 - 212		matig fijn
4	212 - 300		matig grof
5	300 - 425		zeer grof
6	425 - 2000		uiterst grof

Sortering	
7	buitengewoon-zeer goed
6	zeer goed-goed
5	goed
4	goed-matig
3	matig
2	matig-slecht
1	slecht

Volumegehalte klei

5 = V_{cl} (<16µm) in %

Voorbeeld:

3	Korrelgrootte
5 •	Sortering
35-10-15	Volumegehalte klei
B M T	Basis ⟶ Top

Brabant maximaal, bij Woensdrecht 57 m, en neemt in noordwestelijke richting af tot ongeveer 25 - 30 m.
Het Complex van Kallo bestaat uit een afwisseling van zand- en kleilagen. In de omgeving van Woensdrecht zijn de zanden aan de basis matig tot zeer fijn en goed gesorteerd, naar de top worden de zanden uiterst fijn en zijn ze slecht gesorteerd. Het gehalte aan klei en fijn silt van de zandige afzettingen neemt over het algemeen toe van de basis naar de top ervan (nabij Woensdrecht van ca. 0,08 tot 0,32). De afzettingen van het Complex van Kallo die bestaan uit goed gesorteerde zanden met een gehalte aan klei en fijn silt van enkele procenten hebben een permeabiliteit van gemiddeld tenminste 1 μm^2, met lokaal permeabiliteiten tot 3 μm^2. De permeabiliteit van de sterk kleihoudende trajecten is een orde van grootte minder. Het Complex van Kallo wordt bedekt door de afzettingen van het Zand van Berg; zie paragraaf 4.4.5.

Op basis van de beschikbare gegevens kan geconcludeerd worden dat de zandig ontwikkelde lagen of niveaus binnen het Complex van Kallo mogelijk in aanmerking komen als reservoirgesteente voor grootschalige opslag van warmte en voor aardwarmtewinning; dit in combinatie met de afzettingen van het Zand van Berg; zie paragraaf 4.4.5.

4.4.5 Zand van Berg

Het Zand van Berg komt voor in het grootste deel van Nederland; de afzettingen komen niet voor op het Kijkduin-Hoog met een aangrenzend deel van het gebied van de grote rivieren, in Zuid-Limburg, het midden van Noord-Holland met het aangrenzende zuidwestelijk deel van het IJsselmeer, en in delen van Oost-Twente; zie Fig. 4.16.
In het zuiden van Nederland varieert de diepteligging van maaiveld in Zeeuws-Vlaanderen tot maximaal 1800 m in de Centrale Slenk. Op de Peelhorst liggen de afzettingen op een diepte van 400 tot 525 m. In centraal en noordelijk Nederland varieert de diepteligging van het Zand van Berg van maximaal 1300 m in zuidelijk Flevoland tot aan maaiveld in Oost-Twente; zie bijlage 8.
Het Zand van Berg heeft in het zuiden van Nederland over het algemeen een dikte van ca. 20 - 30 m. In het westen van centraal Nederland bedraagt de dikte 5 - 15 m, oostwaarts neemt deze toe van ca. 15 - 25 m tot 30 m of meer in Twente en omgeving; hier treden sterke

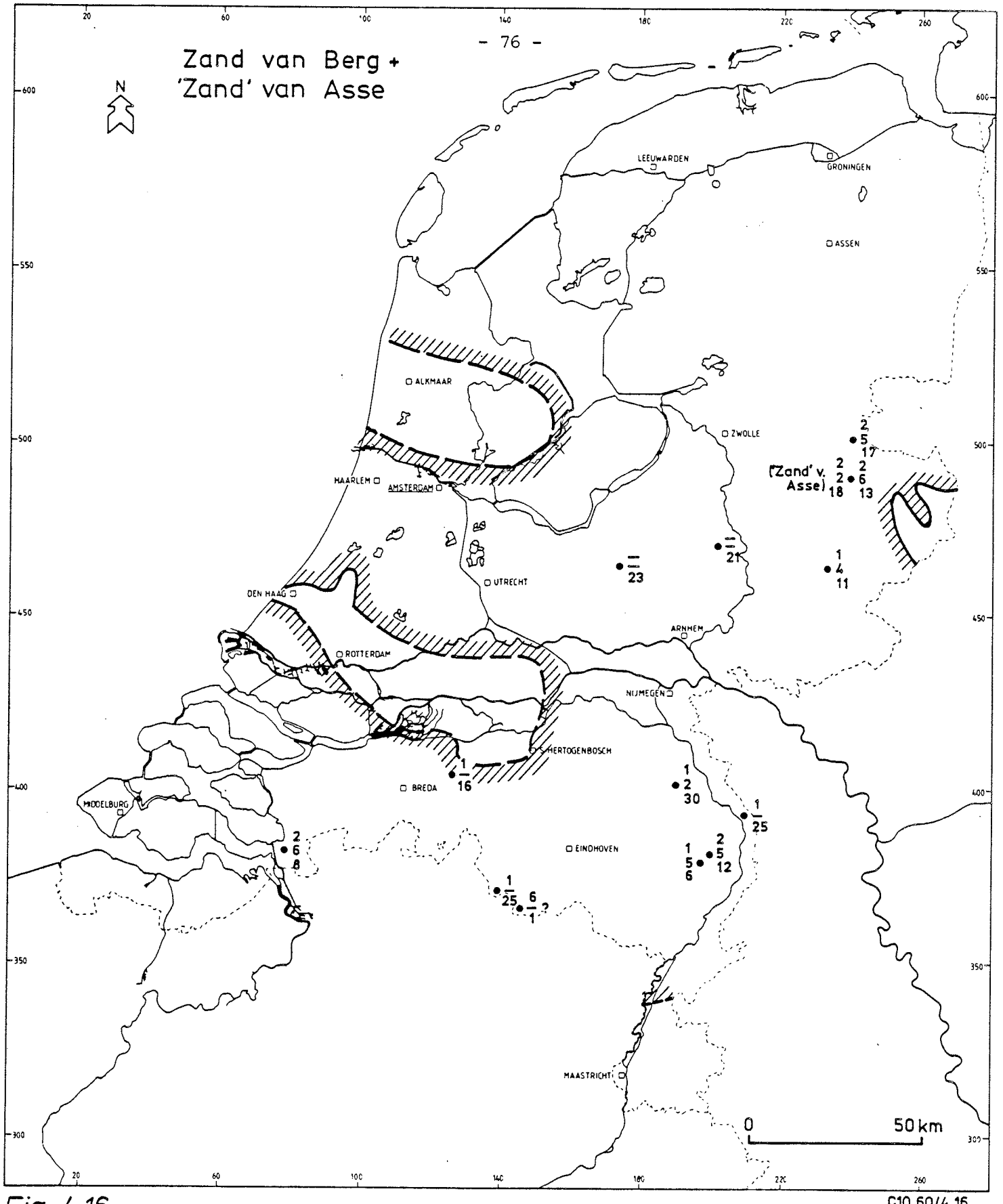


Fig. 4.16

C10.60/4.16

Korrelgrootte

1	63 - 106	uiterst fijn
2	106 - 150	zeer fijn
3	150 - 212	matig fijn
4	212 - 300	matig grof
5	300 - 425	zeer grof
6	425 - 2000	uiterst grof

Sortering

7	buitengewoon-zeer goed
6	zeer goed-goed
5	goed
4	goed-matig
3	matig
2	matig-slecht
1	slecht

Volumegehalte klei

5 = V_{Cl} (<16 µm) in %

Voorbeeld:

3	Korrelgrootte
5	Sortering
35-10-15	Volumegehalte klei
B M T	Basis ⟶ Top

diktevariaties op. In de kop van Noord-Holland, de noordelijke provincies en het Waddengebied is de dikte van de afzettingen veelal 5 - 15 m, zeer plaatselijk ca. 25 - 30 m.
Het Zand van Berg bestaat uit uiterst fijne tot zeer fijne zanden. Kleiïge inschakelingen komen veel voor. De zanden worden overwegend fijner in noordwestelijke richting. In centraal Nederland bevat het Zand van Berg enkele harde zandsteenbankjes. In Twente en de Achterhoek is meestal een conglomeraat aanwezig aan de basis van de eenheid. De zanden zijn in Zuid-, Zuidoost- en Oost-Nederland goed tot matig gesorteerd. Waarschijnlijk wordt de sortering slechter in globaal noordwestelijke richting. Het gehalte aan klei en fijn silt wisselt sterk, met name in zuidelijk Nederland (ca. 0,06 - 0,30). In Twente en omgeving bedraagt het gehalte ca. 0,11 - 0,17. Het klei- en fijn siltgehalte neemt toe in globaal noordwestelijke richting.
Vooral in Twente en omgeving zijn de afzettingen direkt onder het Zand van Berg - behorende tot de Klei van Asse - relatief zeer zandig. De zandige top van de Klei van Asse heeft een dikte van 20 - 50 m. Deze zanden zijn zeer fijn en matig tot slecht gesorteerd. Het gehalte aan klei en fijn silt bedraagt ongeveer 0,18. Het Zand van Berg vormt in deze regio veelal één zandcomplex met de zandige top van de Klei van Asse. In het voorkomensgebied van het Complex van Kallo (zie paragraaf 4.4.4.) vormt deze eenheid tezamen met het Zand van Berg één zandpakket. Daar bestaan de afzettingen van het Zand van Berg uit goed gesorteerde, fijne zanden met een gehalte aan klei en fijn silt van enkele procenten; de permeabiliteit bedraagt er gemiddeld tenminste 1 μm^2. De permeabiliteit van de meer kleirijke zanden is veel lager en bedraagt veelal minder dan 0,1 μm^2; de permeabiliteit van zanden met een kleigehalte van ca. 0,20 bedraagt veelal minder dan 0,01 μm^2.
Het Zand van Berg wordt in het gehele voorkomensgebied afgedekt door een dik kleipakket: de Klei van Boom. De dikte van de kleilaag bedraagt over het algemeen 30 - 150 m.

Op basis van de beschikbare gegevens kan geconcludeerd worden dat het Zand van Berg vrijwel op geen enkele lokatie in aanmerking komt als reservoirgesteente voor grootschalige opslag van warmte (mogelijk m.u.v. Twente) en voor aardwarmtewinning. In combinatie met de

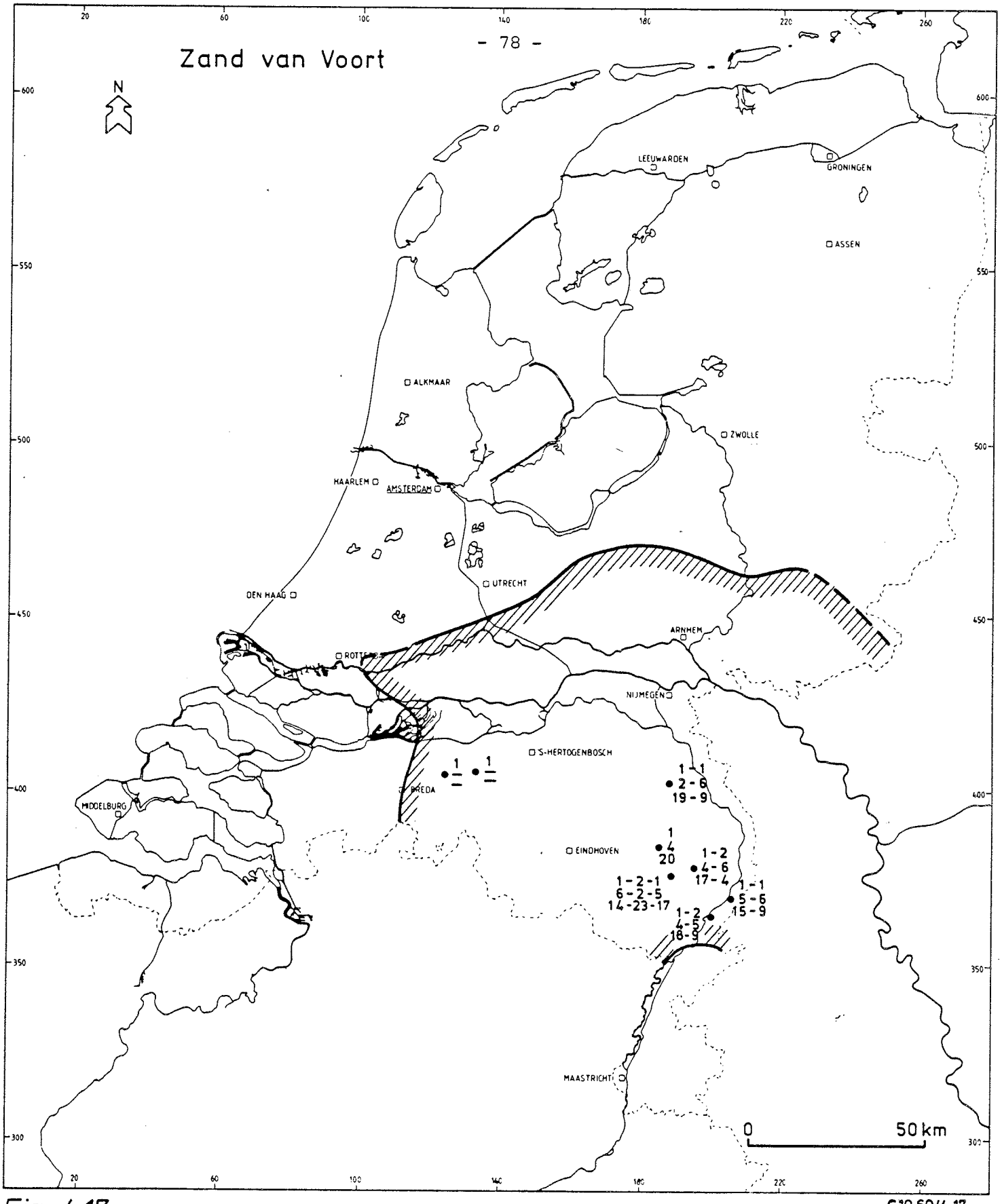


Fig. 4.17

C10.60/4.17

Korrelgrootte

1	63 - 106		uiterst fijn
2	106 - 150		zeer fijn
3	150 - 212		matig fijn
4	212 - 300		matig grof
5	300 - 425		zeer grof
6	425 - 2000		uiterst grof

Sortering

7	buitengewoon-zeer goed
6	zeer goed-goed
5	goed
4	goed-matig
3	matig
2	matig-slecht
1	slecht

Volumegehalte klei

5 = V_{cl} (<16 µm) in %

Voorbeeld:

3	Korrelgrootte
5 •	Sortering
35-10-15	Volumegehalte klei
B M T	Basis ⟶ Top

afzettingen van het Complex van Kallo (paragraaf 4.4.4) vormen de afzettingen van het Zand van Berg een reservoirgesteente met voldoende dikte en diepteligging om lage temperatuur-aardwarmtewinning, en eventueel opslag, mogelijk te maken.

4.4.6 Zand van Voort

Het Zand van Voort komt voor in het midden en oosten van Noord-Brabant, Noord-Limburg, het zuidoosten van Zuid-Holland, en het midden en zuiden van Utrecht en Gelderland; zie Fig. 4.17.
De top van de afzettingen ligt op een diepte variërend van ca. 500 m in het westen en noorden van het voorkomensgebied tot ca. 1400 m in de Centrale Slenk. Op de Peelhorst ligt de top van het Zand van Voort op een diepte van niet meer dan 100-200 m; zie bijlage 9.
De dikte van het Zand van Voort neemt naar het zuidoosten toe van ca. 15 m in het westelijk deel van het voorkomensgebied tot ruim 200 m in het zuidoosten van de Centrale Slenk. In het zuiden van de Peelhorst en de Venlo Slenk bedraagt de dikte 150-180 m, naar het noorden neemt de dikte vrij snel af van 70 m in de omgeving van Oploo tot ca. 15-20 m in het noorden van het voorkomensgebied.
Het Zand van Voort bestaat grotendeels uit een uiterst fijn kleiïg zand; in het zuidoosten van het voorkomensgebied zijn de zanden in het bovenste deel van het zandlichaam zeer fijn. In het zandpakket treedt vaak een afwisseling op van harde en relatief zachte zandsteenlagen. De mate van sortering van de zanden lijkt van de basis naar de top iets toe te nemen (respectievelijk van matig tot goed) en het gehalte aan klei en fijn silt neemt naar de top van het zandpakket af; in het zuidoosten van het voorkomensgebied bedraagt het gehalte aan de basis en de top respectievelijk ongeveer 0,2 en 0,1. Naar het noordwesten worden de afzettingen van het Zand van Voort steeds kleiïger.
Enkele lagen binnen het Zand van Voort bestaan uit fijne zanden met een gering gehalte aan klei en fijn silt en hebben een permeabiliteit die gemiddeld ongeveer 1 μm^2 bedraagt. De meestal uiterst fijne, kleihoudende zanden hebben echter een aanzienlijk lagere permeabiliteit, in de orde van 0,1 μm^2.
Het Zand van Voort wordt in het grootste gedeelte van het voorkomensgebied afgedekt door de ca. 10 tot 100 m dikke Klei van Veldhoven; op de Peelhorst wordt het Zand van Voort bedekt door zandige

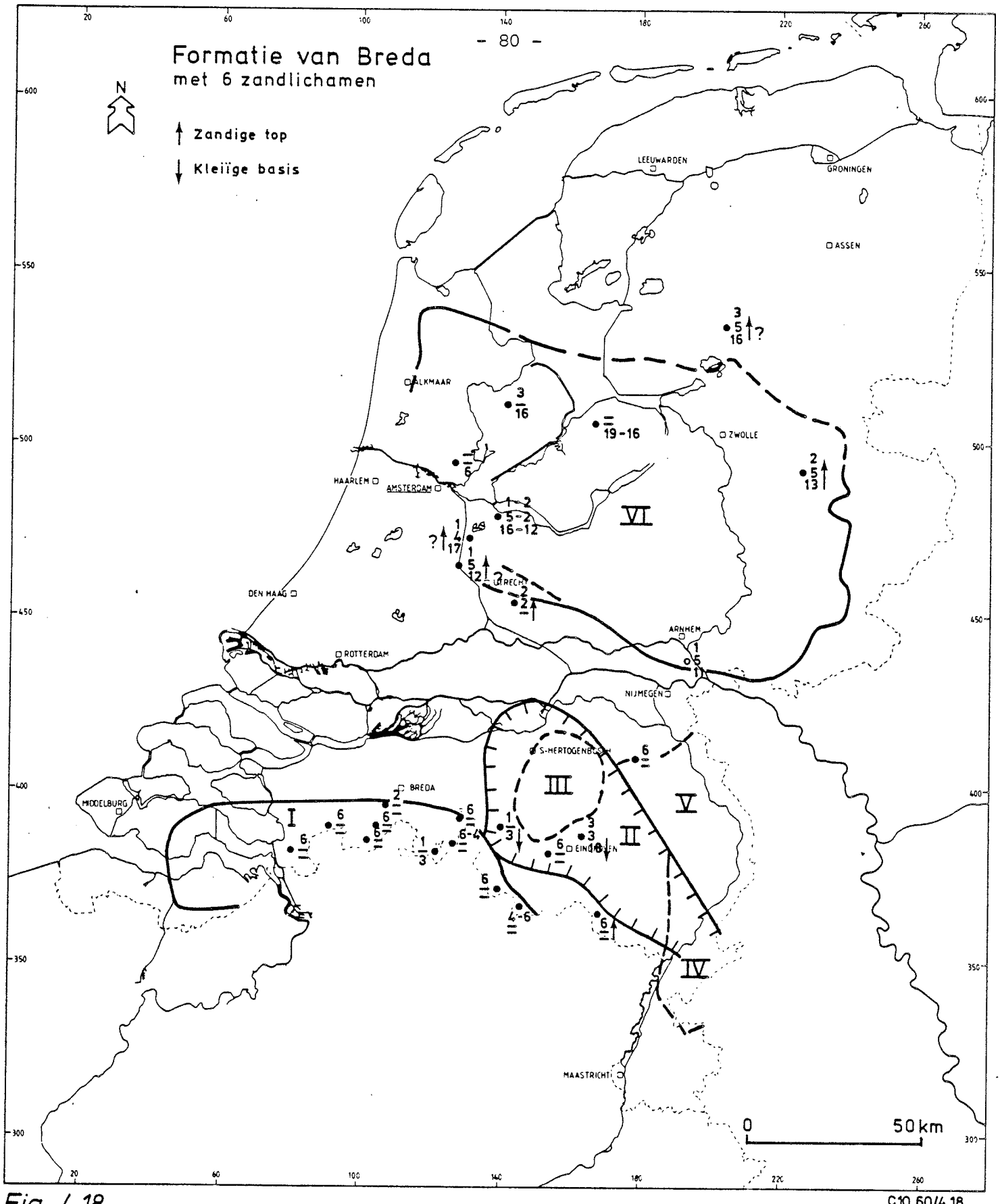


Fig. 4.18

C10.60/4.18

Korrelgrootte

1 63 - 106 uiterst fijn
2 106 - 150 zeer fijn
3 150 - 212 matig fijn
4 212 - 300 matig grof
5 300 - 425 zeer grof
6 425 - 2000 uiterst grof

Sortering

7 buitengewoon-zeer goed
6 zeer goed-goed
5 goed
4 goed-matig
3 matig
2 matig-slecht
1 slecht

Volumegehalte klei

5 = V_{cl} (<16 µm) in %

Voorbeeld:

3 Korrelgrootte
5 • Sortering
35-10-15 Volumegehalte klei
B M T Basis ⟶ Top

afzettingen behorende tot de Formatie van Breda (paragraaf 4.4.7).

Op basis van de beschikbare gegevens kan geconcludeerd worden dat het Zand van Voort grotendeels niet in aanmerking komt als reservoirgesteente voor lage temperatuur-aardwarmtewinning of warmte-opslag; de lokaal voorkomende zanden met een gering gehalte aan klei en fijn silt vormen mogelijk een uitzondering.

4.4.7 Formatie van Breda

De Formatie van Breda komt voor in het grootste gedeelte van de ondergrond van Nederland; de afzettingen zijn afwezig in het uiterste zuiden en westen van Zeeland, de omgeving van Den Haag, Zuid-Limburg, Oost-Twente, plaatselijk in Groningen en rond Terschelling; zie Fig. 4.18 en bijlage 9. De formatie bestaat uit een afwisseling van zanden, kleiïge zanden en kleien. De zandige eenheden binnen de formatie verschillen sterk wat betreft verbreiding, diepteligging, dikte en karakter. Er kunnen in totaal een zestal belangrijke zandpakketten worden onderscheiden, deels met een verschillende regionale verbreiding, deels boven elkaar liggend, en gescheiden door kleipakketten. Deze worden hier aangeduid met de Romeinse cijfers I t/m VI. De permeabiliteiten die vermeld worden betreffen grotendeels schattingen; gemeten permeabiliteiten zijn nauwelijks beschikbaar.

Het Zandpakket I van de Formatie van Breda komt voor in het zuidoosten van Zeeland en in het zuiden van Noord-Brabant, buiten de Centrale Slenk; zie bijlage 10. De diepteligging van de top van het zandpakket neemt geleidelijk toe van ca. 20 m in het zuidoosten van Zeeland tot ca. 100 m in het oostelijk deel van het verbreidingsgebied. De dikte neemt oostwaarts toe van ca. 30 tot ca. 300 m. De zanden zijn matig grof tot uiterst grof en overwegend goed gesorteerd. Het gehalte aan klei en fijn silt is gering. De afzettingen hebben een permeabiliteit die waarschijnlijk gemiddeld tenminste 10 μm^2 bedraagt, en lokaal mogelijk waarden bereikt van meer dan 50 μm^2. Het zandpakket wordt afgedekt door een aantal kleiïge niveaus.

Het Zandpakket IV van de Formatie van Breda komt voor in de zuidoostelijke zone van de Centrale Slenk, globaal ten zuidoosten van Asten (bijlage 10). De top van het zandpakket ligt in de omgeving van Asten op een diepte van ca. 300 m. Zuidoostelijk van Asten varieert de diepteligging van ca. 125 - 200 m. De dikte bedraagt ongeveer 150 - 200 m. De zanden zijn matig grof en goed gesorteerd en bevatten soms grind. Het zandpakket heeft niveaus met een hoog gehalte aan klei en fijn silt en niveaus met verkittingen (ijzerzandsteen). Het gehalte aan klei en fijn silt is overwegend laag; het neemt toe in noordwestelijke richting. De afzettingen hebben een permeabiliteit die waarschijnlijk gemiddeld tenminste 10 μm^2 bedraagt, en lokaal mogelijk waarden bereikt van meer dan 50 μm^2. Het zandpakket wordt bedekt door - en gaat in zuidoostelijke richting lateraal over in - een zandige eenheid behorende tot de Kiezeloöliet Formatie: de Grinden van Waubach en de Waubach Zanden (verg. paragraaf 4.4.9).
Het Zandpakket V komt voor op de Peelhorst; zie bijlage 10. De top van het zandpakket ligt over het algemeen enkele tientallen meters onder het maaiveld. De dikte bedraagt ongeveer 125 - 150 m. De zanden zijn overwegend uiterst fijn tot matig fijn, de korrelgrootte neemt toe naar de top. Het basale gedeelte van het pakket is vrij kleiïg, het gehalte aan klei en fijn silt neemt af van de basis naar de top. Het bovenste gedeelte van het zandpakket - met een dikte van ongeveer 30 m - bevat een grindrijke basislaag met daarboven niveaus met verkittingen (ijzerzandsteen) en schelprijke zanden. Het gehalte aan klei en fijn silt is in het bovenste gedeelte van het pakket laag. De basale afzettingen van het zandpakket hebben een permeabiliteit die gemiddeld waarschijnlijk minder dan 1 μm^2 bedraagt. De permeabiliteit van het bovenste gedeelte van het pakket bedraagt gemiddeld waarschijnlijk tenminste 10 μm^2. Boven de zandige eenheid is geen afdekkend kleipakket aanwezig, maar liggen kleiïge zanden, zanden en grindrijke afzettingen, deels behorende tot de Venlo Zanden (verg. paragraaf 4.4.9).

Op basis van de beschikbare gegevens kan geconcludeerd worden dat de afzettingen van de zandpakketten I, IV, en V van de Formatie van Breda zonder meer in aanmerking komen als reservoirgesteente voor lage temperatuur-aardwarmtewinning. De zandpakketten IV en V zijn -

onder meer vanwege het ontbreken van voldoende afsluitende lagen - waarschijnlijk ongeschikt voor grootschalige warmte-opslag. Het zandpakket I komt in principe in aanmerking als reservoirgesteente voor opslag van warmte. Gezien de waarschijnlijke hoge permeabiliteit - die in principe rendement-verlagend werkt - komt opslag van warmte met een relatief laag temperatuurniveau in principe het meest in aanmerking.

De Zandpakketten II en III van de Formatie van Breda komen voor in het gebied van de Centrale Slenk (bijlage 10). De diepteligging van de top van zandpakket II varieert van ca. 400 tot 1300 m en van zandpakket III van ca. 400 tot 1050 m. De zanden hebben overwegend een vrij hoog gehalte aan klei en fijn silt; in eenheid III is het gehalte waarschijnlijk hoger dan in eenheid II. Er lijkt binnen de zandpakketten geen duidelijke trend te zijn in korrelgrootteverdelingen en kleigehalten. Naar het noordwesten worden de zanden kleiïger. De permeabiliteit van beide zandpakketten bedraagt gemiddeld waarschijnlijk minder dan 1 μm^2. Beide zandpakketten worden afgedekt door kleilagen.

Op basis van de beschikbare gegevens kan geconcludeerd worden dat de afzettingen van de zandpakketten II en III van de Formatie van Breda mogelijk in aanmerking komen als reservoirgesteente voor lage temperatuur-aardwarmtewinning. De zandpakketten II en III zijn onder meer vanwege de grote diepteligging minder geschikt om als reservoirgesteente voor grootschalige opslag van warmte te fungeren.

In de voorkomensgebieden van de zandpakketten II en III (Centrale Slenk) komen in de Formatie van Breda bóven de lateraal redelijk uitgestrekte zandpakketten II en III meerdere matig- tot niet-correlleerbare zandlichamen voor met dikten van enige tientallen tot honderd(en) meters, maar met een vrij beperkte, niet exact bekende verbreiding. Aangezien het hier dus niet om één pakket of eenheid gaat zijn deze zandlichamen niet apart benoemd. Het gehalte aan klei en fijn silt zal in het algemeen minder zijn dan in de zandpakketten II en III, en dientengevolge zal de permeabiliteit deels groter zijn dan die van de basale zanden. De zandlichamen worden in het algemeen

afgedekt door kleilagen. De diepteligging en de te verwachten permeabiliteiten maken de eenheden waarschijnlijk lokaal geschikt voor zowel opslag als winning van lage temperatuur-aardwarmte. De lokatiebepaling (plaats en diepte van de zandlichamen) zal echter in de praktijk problemen kunnen geven.

Het Zandpakket VI van de Formatie van Breda komt voor in het gehele gebied van het Zuiderzee Bekken en de randgebieden ervan, met uitzondering van het zuidwestelijk deel van het bekken; zie bijlage 10. De diepteligging van de top van het zandpakket bedraagt ca. 550 m in het centrale deel van het Zuiderzee Bekken, afnemend tot minder dan ca. 50 m in de randgebieden van het bekken. De dikte neemt vanuit het centrale gedeelte van het bekken naar de randgebieden geleidelijk af, van ongeveer 200 tot 50 m. Het zandpakket bestaat hoofdzakelijk uit een uiterst fijn tot zeer fijn zand, afgewisseld met dunne kleilaagjes en silt- en zandsteenlaagjes. De korrelgrootte neemt overwegend toe naar de top van het zandpakket; de sortering is matig tot goed. In het grootste deel van het verbreidingsgebied bedraagt het gehalte aan klei en fijn silt van het zandlichaam ongeveer 0,10 tot 0,20. De afzettingen van het zandpakket VI hebben een permeabiliteit die gemiddeld waarschijnlijk ongeveer 0,3 μm^2 bedraagt, variërend van minder dan 0,1 μm^2 voor de basale lagen tot maximaal 1 μm^2 voor de jongere afzettingen. Het zandpakket wordt grotendeels bedekt door zandige afzettingen behorende tot de Formatie van Oosterhout; langs de oostelijke rand van het Zuiderzee Bekken wordt het pakket bedekt door afzettingen van de Formatie van Scheemda en de Kiezeloöliet Formatie (verg. paragrafen 4.4.8 en 4.4.9).

Op basis van de beschikbare gegevens kan geconcludeerd worden dat het Zandpakket VI van de Formatie van Breda slechts ten dele in aanmerking komt als reservoirgesteente voor lage temperatuur-aardwarmtewinning; dit betreft met name de meest permeabele delen van het zandpakket. Voor grootschalige opslag van warmte komt het zandpakket niet in aanmerking; dit onder andere wegens het vaak ontbreken van een afdekkende kleilaag.

4.4.8 Formatie van Oosterhout

De afzettingen van de Formatie van Oosterhout komen in de ondergrond van een groot gedeelte van Nederland voor; ze zijn afwezig in oostelijk en zuidoostelijk Nederland; zie Fig. 4.19. De basale lagen van de formatie bestaan in een groot deel van Nederland uit zandige afzettingen. Ook de afzettingen aan de top zijn veelal zandig ontwikkeld. Over het algemeen zijn tussen de twee zandpakketten kleiïge niveaus aanwezig. In de randzone van het verbreidingsgebied van de formatie wiggen de kleiïge inschakelingen veelal uit, zodat in deze zone de Formatie van Oosterhout van basis tot top uit zandige afzettingen bestaat. De zandige eenheden aan de basis en in de top van de formatie worden afzonderlijk beschreven; bij de beschrijving van het hoger gelegen zandpakket worden tevens de zones binnen het verbreidingsgebied behandeld waar de formatie van basis tot top geheel uit zandige afzettingen bestaat.

De zandige afzettingen in de basis van de Formatie van Oosterhout komen in een groot gedeelte van het verbreidingsgebied van de formatie voor, maar zijn afwezig in westelijk Nederland. De diepteligging van de top van het basale zandpakket varieert van 40 m in het zuiden van Zuid-Beveland tot 200 m in noordelijk Schouwen-Duiveland en van 50 m in westelijk Noord-Brabant tot ca. 300 m in de Centrale Slenk. In het centrale deel van het Zuiderzee Bekken wordt een diepte bereikt van ca. 400 m, langs de bekkenrandgebieden ca. 200 - 250 m. Naar het noordwesten neemt de diepte toe tot ca. 650 m op Terschelling. De dikte van het basale zandpakket is minimaal 5 m in het zuiden van Zuid-Beveland en neemt toe tot 60 m in het noorden van Schouwen-Duiveland. In westelijk Noord-Brabant bedraagt de dikte ca. 50 m, in oostelijk Noord-Brabant ca. 150 m en neemt vervolgens af tot enige tientallen meters in het centrale en noordelijke verbreidingsgebied. De zanden zijn rijk aan schelpgruis, met name in de zuidelijke en oostelijke randzones van het verbreidingsgebied. In westelijk Noord-Brabant bestaat de formatie vrijwel geheel uit schelpmateriaal. In Zuid-Nederland zijn de zanden matig grof tot uiterst grof, in het centrale en noordelijke deel van Nederland neemt de korrelgrootte toe vanuit het westen naar het oosten,

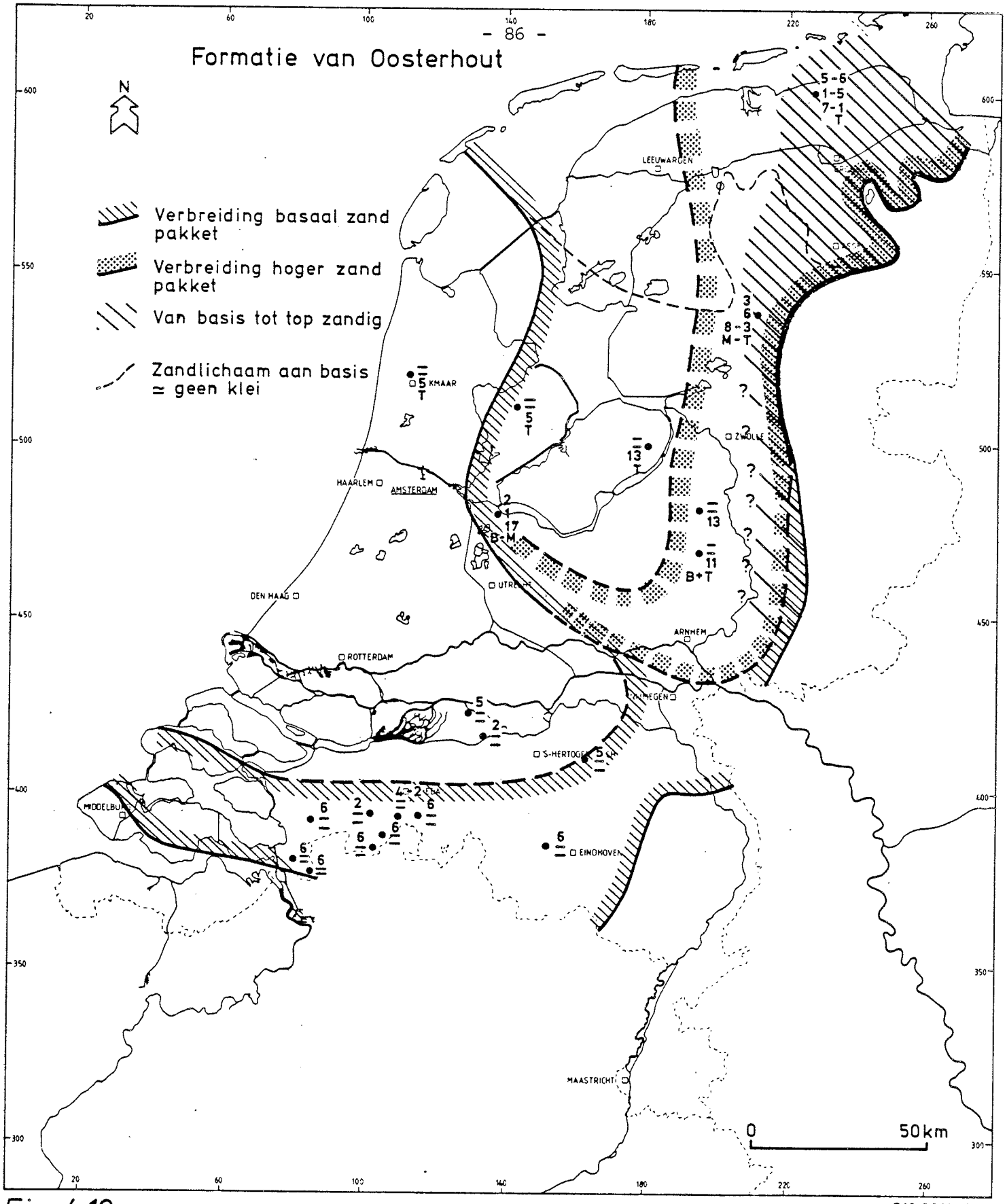


Fig. 4.19

C10.6014.19

Korrelgrootte

1	63 - 106	uiterst fijn
2	106 - 150	zeer fijn
3	150 - 212	matig fijn
4	212 - 300	matig grof
5	300 - 425	zeer grof
6	425 - 2000	uiterst grof

Sortering

7	buitengewoon-zeer goed
6	zeer goed-goed
5	goed
4	goed-matig
3	matig
2	matig-slecht
1	slecht

Volumegehalte klei

5 = V_{cl} (<16µm) in %

Voorbeeld:

3	Korrelgrootte
5 •	Sortering
35-10-15	Volumegehalte klei
B M T	Basis ⟶ Top

respectievelijk van zeer fijn tot matig grof. De mate van sortering varieert aanzienlijk. Het gehalte aan klei en fijn silt is in het zuiden van Nederland zeer laag; hetzelfde geldt waarschijnlijk ook voor het oostelijk deel van Nederland. De fijnzandige afzettingen met een laag gehalte aan klei en fijn silt hebben een permeabiliteit die waarschijnlijk gemiddeld ten minste 5 μm^2 bedraagt; de grovere afzettingen hebben een permeabiliteit die gemiddeld aanzienlijk hoger ligt. Het basale zandpakket wordt veelal afgedekt door zandige kleien behorende tot de Formatie van Oosterhout.

De zandige afzettingen in de top van de Formatie van Oosterhout komen voor in een ca. 25 km brede strook langs de zuidelijke, zuidoostelijke en oostelijke bekkenrandgebieden van het Zuiderzee Bekken. In de noordelijke provincies komen deze zandige afzettingen tot ten minste ca. 50 km ten westen van de oostelijke grens van het verbreidingsgebied voor; zie Fig. 4.19. De top van het zandpakket ligt op een diepte variërend van ca. 250 m langs de westelijke verbreidingsgrens tot ca. 100 m langs de oostelijke rand in centraal Nederland; het zandpakket bereikt langs de paleobekkenranden een dikte van ca. 25 - 70 m; zie bijlage 11. Indien de zandige afzettingen in basis en top van de formatie in de bekkenrandgebieden, evenals in het noordoosten van het verbreidingsgebied van de formatie één zandpakket vormen, bedraagt de dikte ca. 100 m. In de noordwestelijke zone bedraagt de dikte van het zandpakket een tiental meters. De zanden zijn schelprijk en variëren van matig fijn in het westen tot zeer grof langs de oostelijke grens. De sortering van de zanden is sterk wisselend. Het klei- en fijn siltgehalte neemt in oostelijke richting af. In de noordoostelijke zone - waar de Formatie van Oosterhout van basis tot top zandig ontwikkeld is - bestaat de formatie aan de basis uit meer kleihoudende zanden. De permeabiliteit van de grofzandige en/of schelphoudende afzettingen bedraagt waarschijnlijk gemiddeld tenminste enkele tientallen μm^2. De zandige afzettingen aan de top van de Formatie van Oosterhout worden bedekt door afzettingen behorende tot de Formatie van Maassluis.

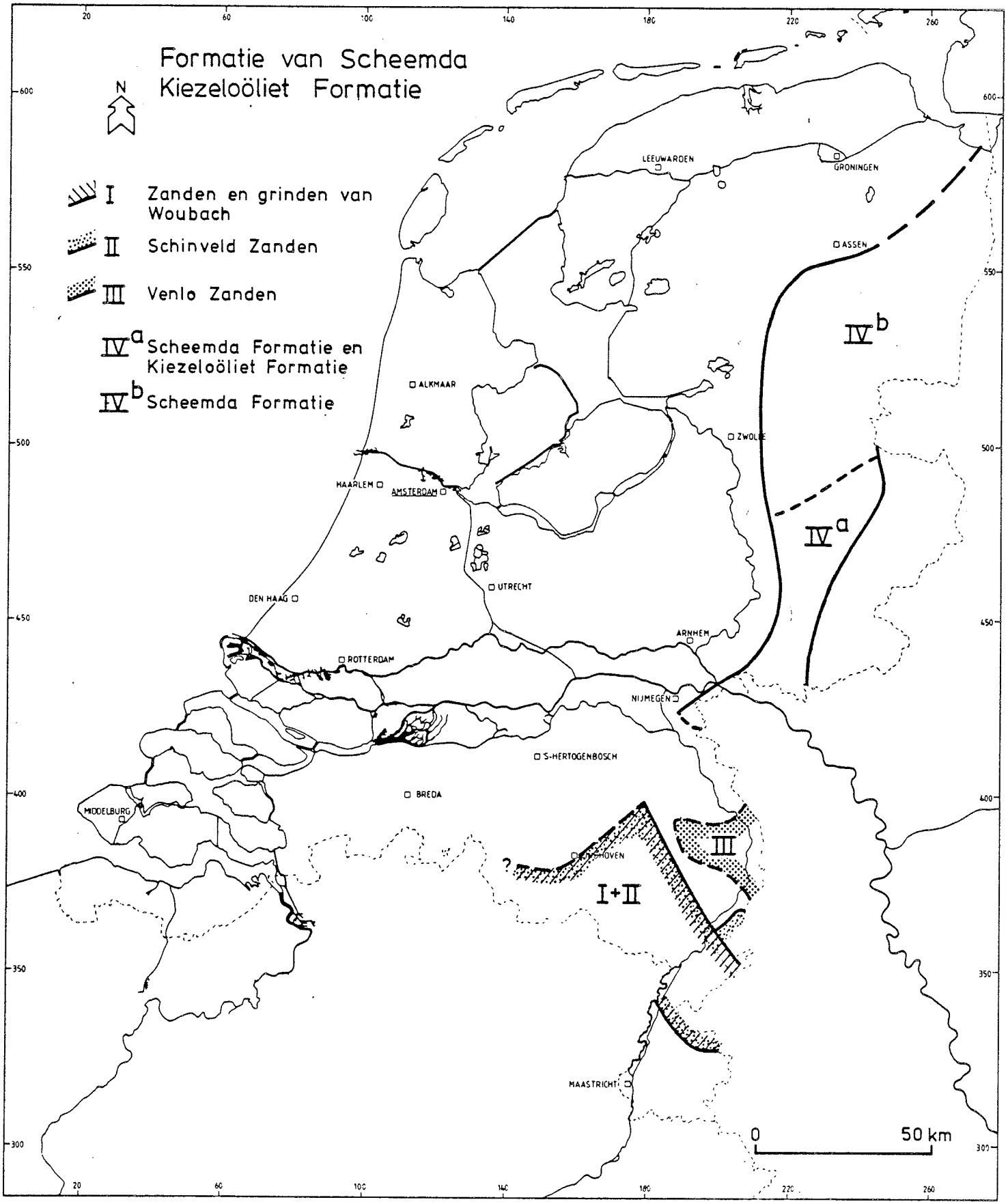


Fig. 4.20

C10.60/4.20

Op basis van de beschikbare gegevens kan geconcludeerd worden dat de meest zandige trajecten van de Formatie van Oosterhout zonder meer in aanmerking komen als reservoirgesteente voor lage temperatuur-aardwarmtewinning. De zandige afzettingen zijn slechts ten dele geschikt voor grootschalige opslag van warmte, omdat goed afsluitende lagen lokaal ontbreken. Gezien de waarschijnlijk overwegend hoge permeabiliteit komt opslag van warmte met een relatief laag temperatuurniveau waarschijnlijk het meest in aanmerking.

4.4.9 Kiezeloöliet Formatie en Formatie van Scheemda

De afzettingen van de Kiezeloöliet Formatie komen uitsluitend in een zone in (zuid)oostelijk Nederland in de ondergrond voor; zie Fig. 4.20. De formatie bestaat uit grove afzettingen, afgewisseld met kleipakketten. Tot de grove afzettingen behoren respectievelijk het Grind van Waubach en de Waubach Zanden, de Schinveld Zanden en de Venlo Zanden. In het oosten en noordoosten van Nederland komen afzettingen behorende tot de Formatie van Scheemda voor, die in de regio Almelo-Nijmegen naast, en mogelijk ook afgewisseld met, de afzettingen van de Kiezeloöliet Formatie voorkomen.

Het Grind van Waubach en de Waubach Zanden komen voor in de Centrale Slenk, globaal van Eindhoven tot Midden-Limburg. De diepteligging varieert sterk door breuktektoniek, met name in het uiterste zuidoosten. De top van de afzettingen ligt bij Eindhoven op een diepte van ca. 280 m. Naar het zuidoosten varieert de diepte van ca. 200 m bij Nederweert en Asten tot ca. 240 - 280 m bij Roermond en van ca. 100 m bij Sittard tot enige tientallen meters boven NAP in het uiterste zuidoosten van het verbreidingsgebied. De dikte neemt overwegend toe in zuidoostelijke richting en varieert over het algemeen van 50 - 150 m. De Waubach Zanden - die hoofdzakelijk voorkomen in het noordwestelijk gedeelte van het verbreidingsgebied - bestaan uit grove, grindarme zanden en gaan zuidoostwaarts over in het Grind van Waubach. De Zanden en Grinden van Waubach bevatten vrij veel kleilagen, waarvan de laterale verbreiding waarschijnlijk niet groot is. De dikte van de kleiïge inschakelingen varieert meestal van 1 m tot 4 m, lokaal worden dikten van maximaal 12 m bereikt. De permeabiliteit van schone grinden bedraagt tenminste

enkele honderden μm^2. De afzettingen van Waubach worden afgedekt door kleiïge afzettingen behorende tot de Klei van Brunssum.

De Schinveld Zanden hebben globaal hetzelfde verbreidingsgebied als de Zanden en Grinden van Waubach. De bovenkant van de Schinveld Zanden ligt veelal ca. 100 m minder diep dan de Waubach afzettingen. De dikte bedraagt enkele tientallen meters. De zanden zijn fijn tot grof en bevatten grindrijke niveaus en enkele klei-inschakelingen. De Schinveld Zanden hebben derhalve gemiddeld een hoge permeabiliteit. De zanden worden afgedekt door kleiïge afzettingen, voornamelijk behorende tot de Klei van Reuver.

De Venlo Zanden komen voor in een gebied zuidoostelijk van Venlo, en plaatselijk op de Peelhorst. De top van de Venlo Zanden ligt enkele tientallen meters onder het maaiveld. De dikte van de zanden bedraagt ongeveer 15 - 30 m. De zanden zijn uiterst grof en vaak grindhoudend en hebben derhalve een hoge permeabiliteit. De zanden worden afgedekt door de Klei van Venlo.

De Formatie van Scheemda komt voor in een noord-zuid verlopende strook met een breedte van ca. 10 - 50 km in het oosten van centraal en noordelijk Nederland; zie Fig. 4.20. In de regio Almelo-Nijmegen komen naast, en mogelijk afwisselend met, de afzettingen van de Formatie van Scheemda ook afzettingen behorende tot de Kiezeloöliet Formatie voor. De bovenkant van de afzettingen ligt veelal tussen ca. 20 en meer dan 100 m onder het maaiveld. In het noorden van Twente en oostelijk van Emmen liggen de afzettingen nabij het oppervlak. De dikte bedraagt maximaal ca. 100 m. De afzettingen bestaan uit fijne, soms grove grindarme zanden, en hebben waarschijnlijk gemiddeld een vrij hoge permeabiliteit. Plaatselijk komen inschakelingen van klei-, veen- of bruinkoollagen voor. De zandige afzettingen van de Formatie van Scheemda worden veelal afgedekt door een kleilaag.

Op basis van de beschikbare gegevens kan geconcludeerd worden dat de afzettingen van het Grind van Waubach en de Waubach Zanden, de Schinveld Zanden, de Venlo Zanden (behorende tot de Kiezeloöliet

Formatie), en de afzettingen van de Formatie van Scheemda zonder meer in aanmerking komen als reservoirgesteenten voor lage temperatuur-aardwarmtewinning. De grovere afzettingen zijn waarschijnlijk goeddeels ongeschikt voor grootschalige opslag van warmte met een relatief hoog temperatuurniveau wegens de overwegend zeer hoge permeabiliteit van de afzettingen; lokaal ontbreken bovendien voldoende afsluitende lagen.

4.4.10 Formatie van Maassluis

De afzettingen van de Formatie van Maassluis komen voor in de ondergrond van een groot gedeelte van Nederland; de afzettingen zijn niet aanwezig in het zuidoosten, oosten en noordoosten van Nederland; zie Fig. 4.21.

De diepteligging van de bovenkant van de afzettingen neemt geleidelijk toe van ca. 20 m in het uiterste zuiden van het verbreidingsgebied tot ca. 350 - 400 m op Terschelling; zie bijlagen 12 en 13.

De dikte van de formatie varieert in het westen van Nederland van ca. 100 m tot 200 m. Naar het oosten neemt de dikte geleidelijk af tot nihil langs de oostelijke verbreidingsgrens.

De Formatie van Maassluis bestaat - afgezien van soms ingeschakelde zandige kleilagen - overwegend uit fijn- tot grofzandige, soms schelprijke afzettingen, waarbij de verhouding zand/klei sterk per regio varieert. Ten zuiden van het Zuiderzee Bekken bestaat de formatie uit fijne en grove schelprijke zanden met ingeschakelde kleilenzen. De sortering van de zanden varieert van matig tot zeer goed. Het gehalte aan klei en silt is binnen de zandige niveaus laag. Langs de zuidwestelijke rand van het Zuiderzee Bekken en deels in Zuid-Holland bestaat de formatie voornamelijk uit zandige klei. Het gehalte aan klei en fijn silt neemt naar de top van het pakket af. Langs de zuidoostelijke en oostelijke bekkenrand en in het noordoosten van het verbreidingsgebied is de formatie zandig ontwikkeld en zeer rijk aan schelpmateriaal. In de top zijn enkele kleilaagjes ingeschakeld.

De zanden variëren van matig fijn tot grof en zijn zeer goed tot matig gesorteerd. Het gehalte aan klei en fijn silt bedraagt ca. 0,04. In het centrale deel van het Zuiderzee Bekken bestaat de formatie aan de basis uit een zandig, schelprijk pakket met daarboven een afwisseling van zanden en kleiïge zanden. Het aantal

Formatie van Maassluis

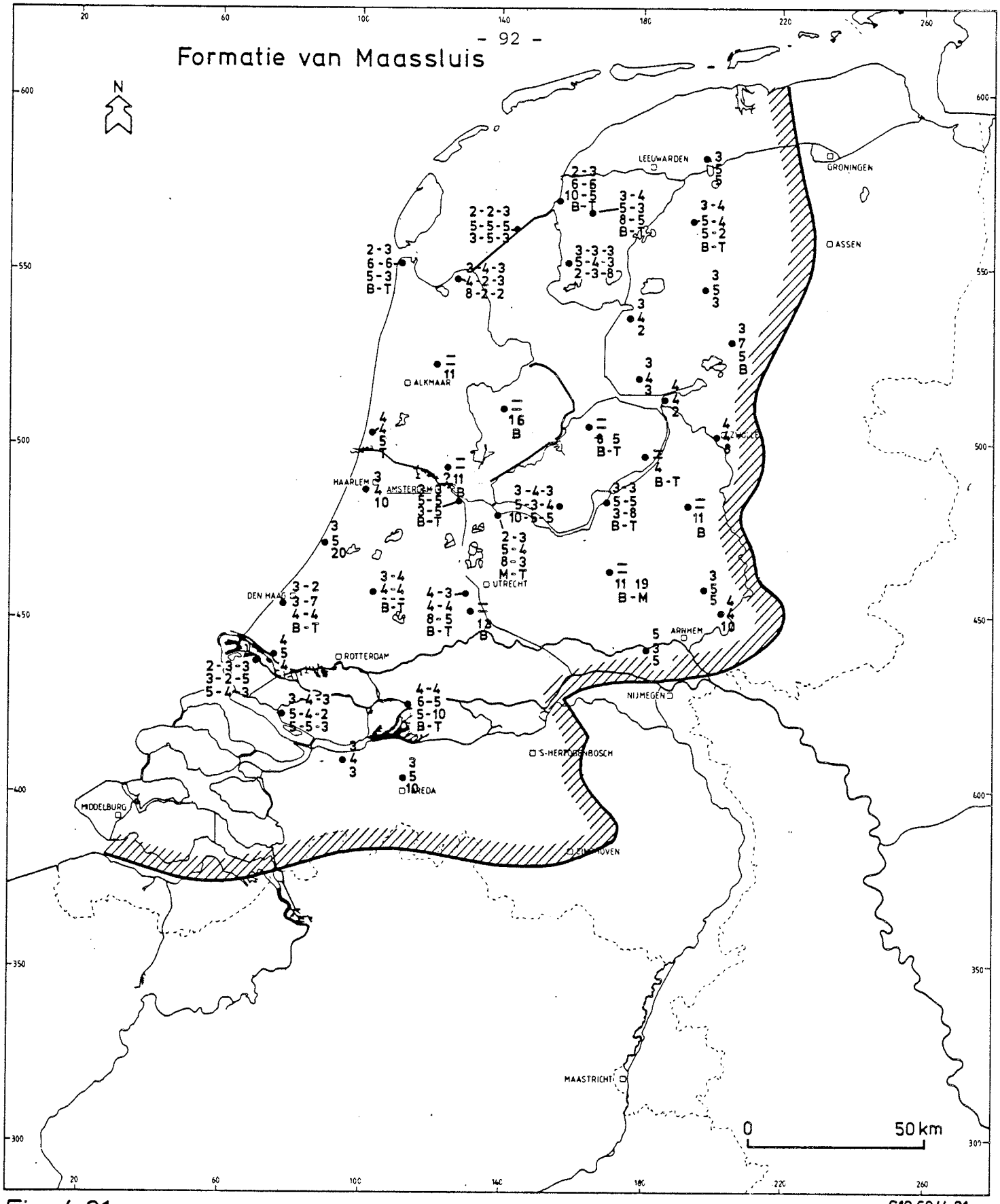


Fig. 4.21

C10.60/4.21

Korrelgrootte

1	63 - 106	uiterst fijn
2	106 - 150	zeer fijn
3	150 - 212	matig fijn
4	212 - 300	matig grof
5	300 - 425	zeer grof
6	425 - 2000	uiterst grof

Sortering

7	buitengewoon-zeer goed
6	zeer goed-goed
5	goed
4	goed-matig
3	matig
2	matig-slecht
1	slecht

Volumegehalte klei

5 = V_{Cl} (<16 µm) in %

Voorbeeld:

3	Korrelgrootte
5 •	Sortering
35-10-15	Volumegehalte klei
B M T	Basis ⟶ Top

zandige intervallen neemt naar het westen toe af. Het gehalte aan klei en fijn silt varieert in deze regio tussen ongeveer 0,03 en 0,16. In het noordwesten van het verbreidingsgebied is de formatie in drie eenheden op te splitsen. De onderste eenheid, met een dikte van ongeveer 50 m, is opgebouwd uit fijne zanden, met soms inschakelingen van zandige kleien. De middelste eenheid, met een dikte van 25 - 40 m, bestaat uit zeer kleiïge zanden en zandige kleien. De bovenste eenheid bestaat uit grove tot fijne zanden met veel schelpfragmenten. Deze eenheid kan een dikte bereiken van 70 m tot meer dan 100 m. Binnen deze bovenste eenheid komen vaak ingeschakelde kleipakketten voor; aan de top van de formatie soms een vele meters dik kleipakket.

De permeabiliteit van de zandige trajecten van de Formatie van Maassluis bedraagt veelal ten minste enkele μm^2 ; waarden van meer dan 5 en 10 μm^2 komen veelvuldig voor. De permeabiliteit van de kleihoudende, fijne zanden is veel lager en bedraagt waarschijnlijk veelal minder dan 0,1 μm^2.

De Formatie van Maassluis wordt bedekt door afzettingen met een sterk variërende samenstelling. In de zuidelijke helft van het verbreidingsgebied wordt de formatie bedekt door afzettingen van de Formatie van Tegelen, die bestaan uit zanden, grind en kleilagen; zie paragraaf 4.5. De afzettingen van de Klei van Tegelen hebben een dikte van enige tientallen meters en kunnen met name in het zuidelijk deel van het Zuiderzee Bekken een afdekkend pakket voor de zanden van de Formatie van Maassluis vormen. In het centrale deel van het Zuiderzee Bekken wordt de Formatie van Maassluis afgedekt door de basale kleilagen van de Formatie van Harderwijk. Deze kleipakketten worden verder noordelijk sporadisch aangetroffen. De Formatie van Maassluis wordt in het noordelijk deel van het verbreidingsgebied bedekt door zanden van de Formatie van Harderwijk; zie paragraaf 4.5.

Op basis van de beschikbare gegevens kan geconcludeerd worden dat de zandige trajecten van de Formatie van Maassluis veelal in aanmerking komen als reservoirgesteenten voor grootschalige opslag van warmte, alsmede voor lage temperatuur-aardwarmtewinning.

4.5 Beschrijving van boven-kwartaire reservoirzanden

De boven-kwartaire afzettingen zijn in het kader van dit onderzoek niet nader bestudeerd, onder meer omdat van de non-mariene zandige afzettingen uit een aantal bronnen relatief veel gegevens betreffende de reservoirkenmerken beschikbaar zijn; de bestaande gegevens zijn over het algemeen voldoende om te kunnen vaststellen of de zandige afzettingen in een bepaalde regio in aanmerking komen als reservoirgesteente voor grootschalige opslag van warmte en voor lage temperatuur-aardwarmtewinning. De lithologische samenstelling - en daarmee de reservoirkenmerken - van de boven-kwartaire afzettingen varieert bovendien in het algemeen sterker over relatief korte afstanden en met de diepte, dan die van met name de mariene tertiaire en onder-kwartaire afzettingen. De boven-kwartaire afzettingen lenen zich om deze reden minder goed voor een beschrijving op landelijke schaal (met kaarten schaal 1 : 500.000) dan de mariene tertiaire en onder-kwartaire afzettingen.

De hydrogeologische gegevens betreffende de boven-kwartaire afzettingen zijn grotendeels vastgelegd in inventarisatierapporten en rapporten inzake geo-elektrisch onderzoek, uitgebracht door de Dienst Grondwaterverkenning TNO. De meeste relevante geologische gegevens zijn vastgelegd in geologische kaarten en toelichtingen daarop, uitgebracht door de Rijks Geologische Dienst. In deze publikatie wordt daarom volstaan met een korte karakterisering van de non-mariene, boven-kwartaire zandige afzettingen die mogelijk in aanmerking komen als reservoirgesteente voor grootschalige opslag van warmte of voor lage temperatuur-aardwarmtewinning. Overigens bestaan ook de boven-kwartaire afzettingen die in zee of bij de kust zijn gevormd, of van lokale herkomst zijn, ten dele uit zandige afzettingen. Lokaal kunnen ook dergelijke zandige afzettingen - behorende tot bijvoorbeeld de Westland Formatie - in aanmerking komen als reservoirzand voor opslag van warmte, met een laag temperatuurniveau of voor lage temperatuur-aardwarmtewinning.

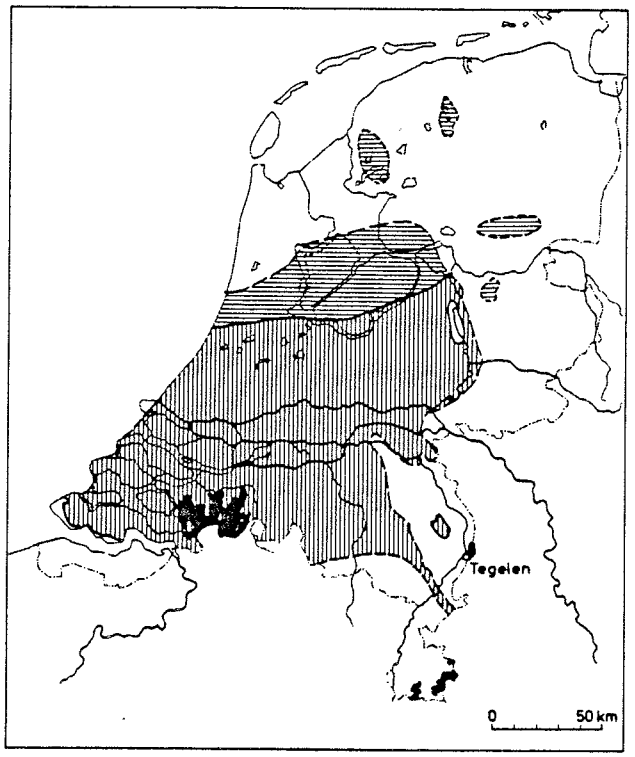
Zandige kwartaire afzettingen van non-mariene oorsprong komen vrijwel overal in de ondergrond van Nederland voor. De afzettingen behoren tot een groot aantal formaties en bestaan deels uit middelgrove tot grove, soms grindhoudende zanden. De zandige afzettingen verschillen sterk wat betreft voorkomen, diepteligging en dikte. Er kunnen acht formaties worden onderscheiden die deels uit zandige

afzettingen bestaan. Dit zijn respectievelijk de Formaties van Tegelen, Harderwijk, Kedichem, Enschede, Sterksel, Veghel, Urk en Kreftenheye.

De Formatie van Tegelen komt voor in een groot gedeelte van de ondergrond van zuidelijk en centraal Nederland; de verbreiding is weergegeven in Fig. 4.22. De diepte tot de bovenkant van de formatie varieert van dagzomend tot meer dan 200 m onder maaiveld. De dikte varieert van ca. 10 tot 100 m. De formatie bestaat uit een afwisseling van kleien, zanden en grinden. De zanden zijn overwegend grof en bevatten vooral in het gebied van de Centrale Slenk een aanzienlijke fractie grind. De Formatie van Tegelen wordt grotendeels afgedekt door de Formatie van Kedichem.

De Formatie van Harderwijk komt voor in het grootste gedeelte van de ondergrond van noordelijk en centraal Nederland; de verbreiding is weergegeven in Fig. 4.23. De diepte tot de bovenkant van de formatie varieert van ca. 50 tot 120 m in het Zuiderzee Bekken en Noord-Nederland en tot nabij het oppervlak in het oostelijk gedeelte van het verbreidingsgebied. De dikte kan oplopen tot meer dan 120 m. De formatie bestaat overwegend uit grove zanden, met inschakelingen van fijne grinden. In het zuidelijk deel van het verbreidingsgebied in Midden-Nederland is de eenheid aan de onderkant begrensd door doorlopende kleilagen; verder noordelijk komen kleiïge inschakelingen in het onderste gedeelte van de eenheid voor. De Formatie van Harderwijk wordt in het uiterste zuiden van het verbreidingsgebied bedekt door afzettingen van de Formatie van Kedichem en in het noorden door de Formatie van Enschede.

De Formatie van Kedichem komt in de ondergrond van zuidelijk Nederland voor, globaal ten zuiden van de lijn Haarlem-Arnhem, met uitzondering van grote delen van Zeeland en West Brabant; de verbreiding is weergegeven in Fig. 4.24. De diepte tot de bovenkant van de formatie varieert van dagzomend tot maximaal ca. 90 m onder maaiveld (nabij Eindhoven). De dikte varieert van ca. 10 tot 120 m. De formatie bestaat overwegend uit fijne zanden afge- wisseld met kleilagen; grove zanden en grinden komen alleen voor in een oost-west verlopende strook globaal langs de noordrand van het verbreidingsgebied. De Formatie van Kedichem wordt grotendeels bedekt door afzettingen van de Formatie van Sterksel.



Verbreiding van de Formatie van Tegelen

Formatie van Tegelen aan of nabij het oppervlak

Gebied met kleilagen van de Formatie van Harderwijk die sterk lijken op de Klei van Tegelen

Fig. 4-22 Verbreiding van de Formatie van Tegelen

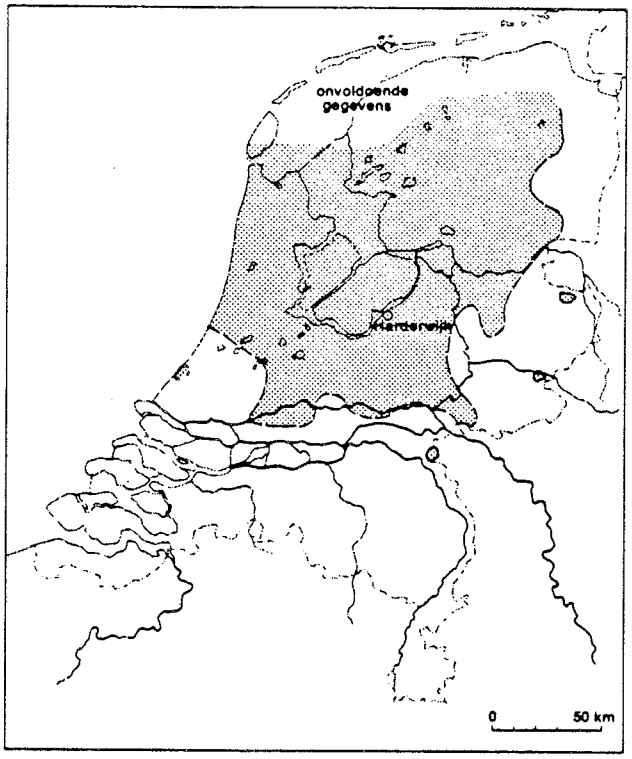
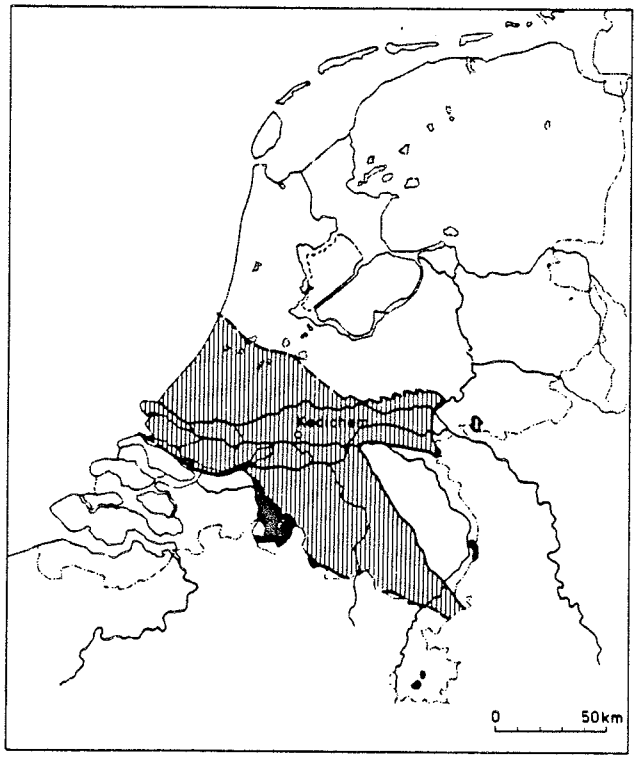


Fig. 4-23 Verbreiding van de Formatie van Harderwijk



Verbreiding van de Formatie van Kedichem

Formatie van Kedichem aan of nabij het oppervlak

Fig. 4-24 Verbreiding van de Formatie van Kedichem

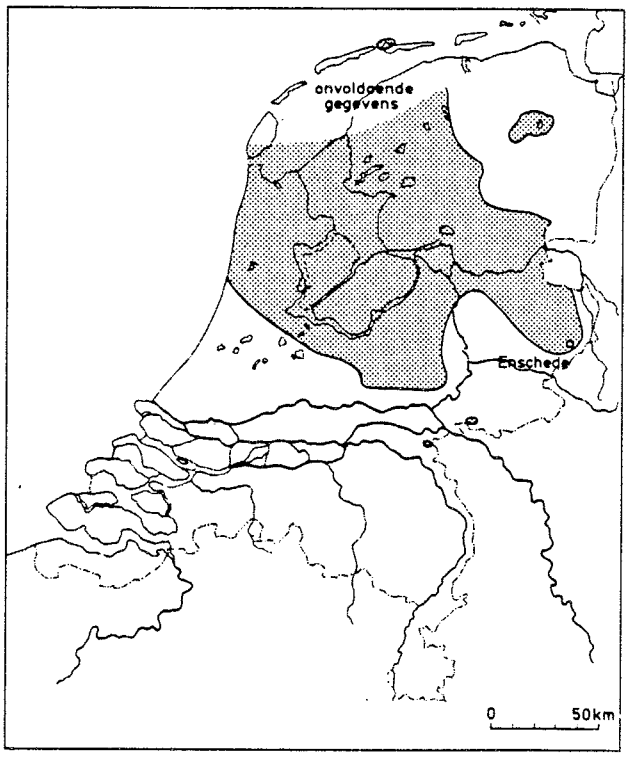


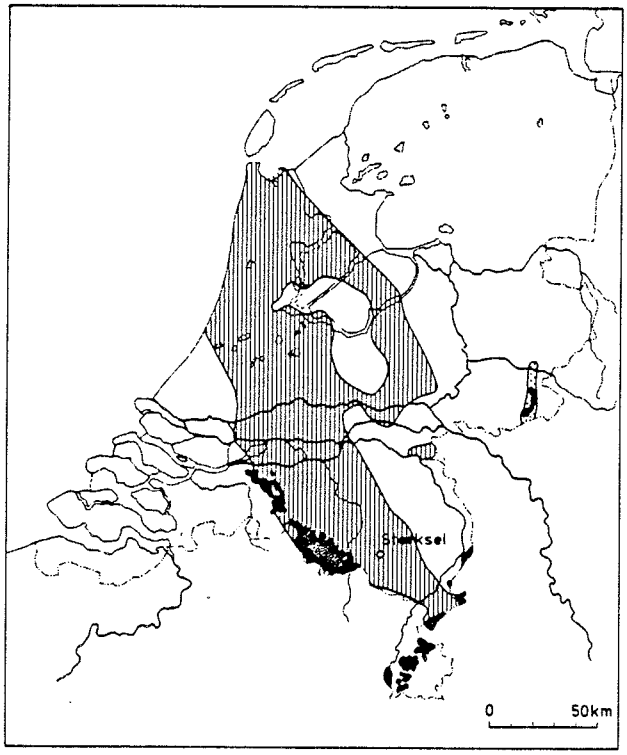
Fig. 4-25 Verbreiding van de Formatie van Enschede

De Formatie van Enschede komt voor in de ondergrond van centraal en noordwestelijk Nederland; de verbreiding is weergegeven in Fig. 4.25. De diepte tot de bovenkant van de formatie varieert veelal van 50 à 80 m in het Zuiderzee Bekken en noordwest Nederland, tot nabij het oppervlak in Oost-Nederland. De dikte van de eenheid varieert van ca. 5 tot 50 m. De formatie bestaat overwegend uit grove, grindhoudende zanden; in de basale lagen bevinden zich op verschillende niveaus lagen met grof grind en stenen tot blokgrootte. De Formatie van Enschede wordt grotendeels bedekt door afzettingen van de Formatie van Urk.

De Formatie van Sterksel komt voor in de ondergrond van een noordwest-zuidoost over Nederland verlopende strook, de verbreiding is weergegeven in Fig. 4.26. De diepte tot de bovenkant van de formatie varieert over het algemeen tussen 30 en 50 m. De dikte bedraagt veelal tussen 10 en 60 m. De formatie bestaat overwegend uit grove, grindhoudende zanden; in Limburg soms geheel uit grinden. Kleilenzen komen slechts sporadisch voor. De Formatie van Sterksel wordt in het zuidoostelijke deel van het verbreidingsgebied bedekt door afzettingen van de Formatie van Veghel, verder noordelijk onder meer door de Formatie van Urk.

De Formatie van Veghel komt uitsluitend voor in de ondergrond van een deel van zuidoost-Nederland; de verbreiding is weergegeven in Fig. 4.24. De diepte tot de bovenkant van de formatie varieert van dagzomend tot ruim 25 m onder maaiveld. De dikte bedraagt ca. 10 tot 20 m. De formatie bestaat overwegend uit grove, deels grindhoudende zanden; de basale lagen bestaan veelal uit grindbanken. Klei- en veenlagen komen slechts in beperkte mate voor. De Formatie van Veghel wordt ten dele bedekt door afzettingen van de Formatie van Kreftenheye.

De Formatie van Urk komt voor in de ondergrond van grote delen van Midden- en Noord-Nederland; de verbreiding is weergegeven in Fig. 4.28. De diepte tot de bovenkant van de formatie varieert over het algemeen tussen ca. 15 en 45 m onder maaiveld. De dikte varieert van ca. 10 tot 50 m. De formatie bestaat overwegend uit grove zanden, met soms inschakelingen van grind; lokaal komen fijnzandige trajec-

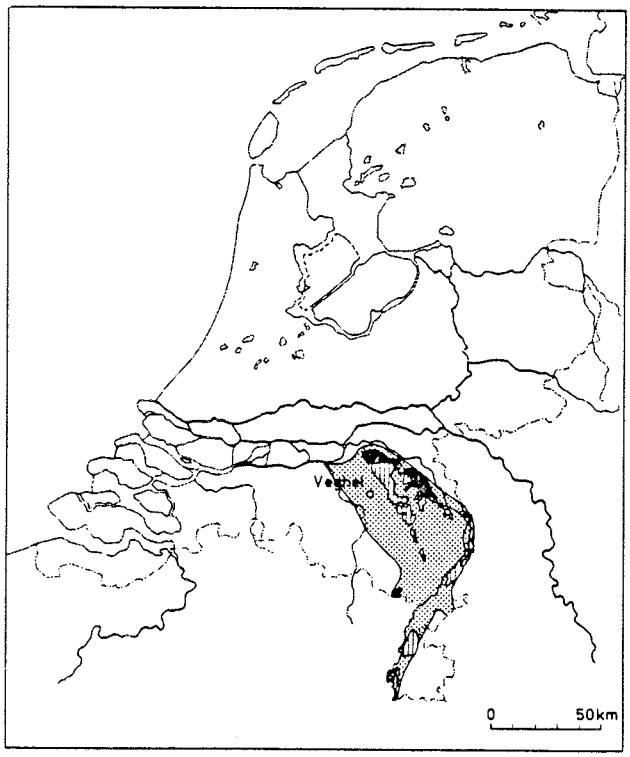


Verbreiding van de Formatie van Sterksel

Formatie van Sterksel aan of nabij het oppervlak

Afzettingen die voorlopig tot de Formatie van Sterksel worden gerekend

Fig. 4-26 Verbreiding van de Formatie van Sterksel

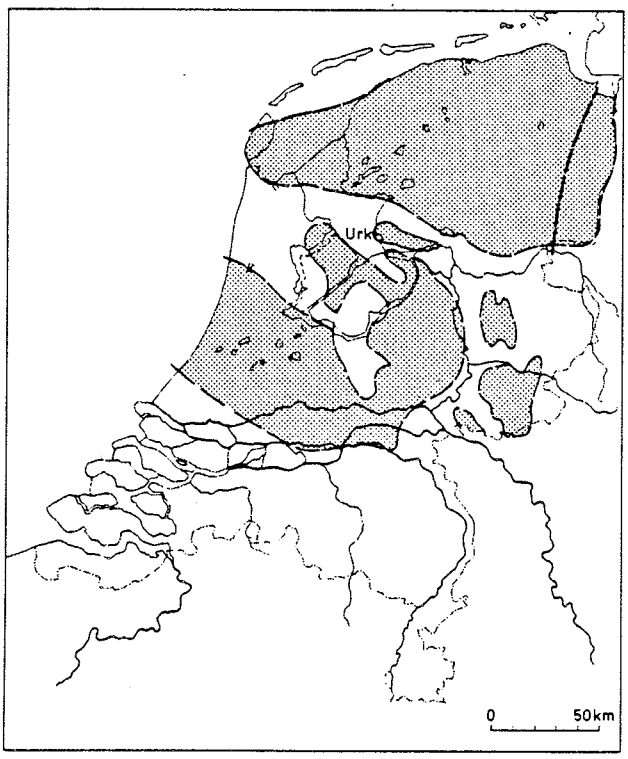


Verbreiding van de Formatie van Veghel

Formatie van Veghel aan of nabij het oppervlak

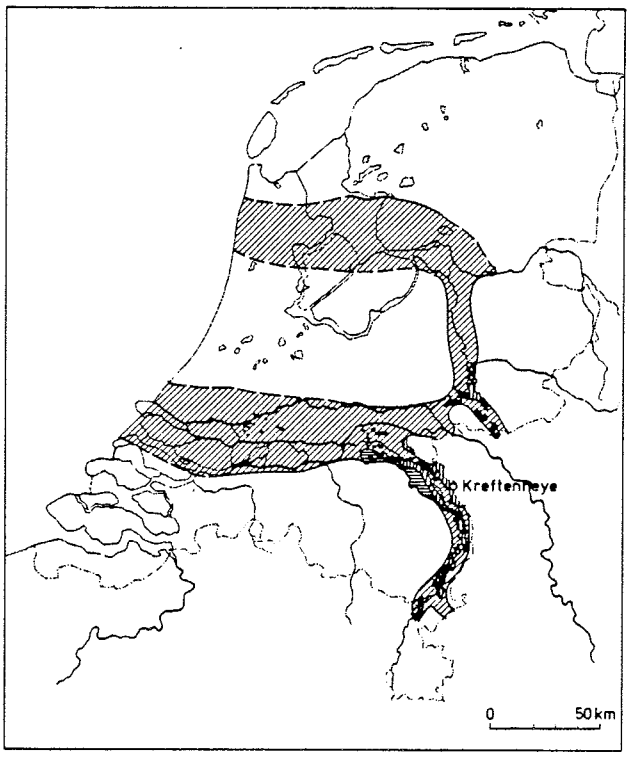
Formaties van Veghel en Kreftenheye aan of nabij het oppervlak

Fig. 4-27 Verbreiding van de Formatie van Veghel



Oostgrens van hoge augietwaarden in noordoostelijk Nederland

Fig. 4-28 Verbreiding van de Formatie van Urk



Verbreiding van de Formatie van Kreftenheye

Formatie van Kreftenheye aan of nabij het oppervlak

Formaties van Kreftenheye en Veghel aan of nabij het oppervlak

rivierduinen (donken)

Fig. 4-29 Verbreiding van de Formatie van Kreftenheye

ten en klei- en veenlagen voor. De Formatie van Urk wordt gedeeltelijk bedekt door afzettingen van de Formatie van Kreftenheye.

De afzettingen van de Formatie van Kreftenheye komen voor in een aantal afzonderlijke zones in de ondergrond van centraal en zuidoostelijk Nederland; de verbreiding is weergegeven in Fig. 4.29. De diepte tot de bovenkant van de formatie varieert van dagzomend tot meer dan 25 m onder maaiveld. De dikte varieert van ca. 10 tot 25 m. De formatie bestaat overwegend uit grove grindhoudende zanden; plaatselijk (in Limburg) bestaat de eenheid geheel uit grind. Op enkele plaatsen komen ingeschakelde veen- en kleilagen voor. Aan de bovenkant van de Formatie van Kreftenheye is een afdekkende laag leem frequent aanwezig.

Op basis van de beschikbare geo(hydro)logische informatie betreffende de reservoirkenmerken van de non-mariene zandige kwartaire afzettingen kan geconcludeerd worden dat de zandige afzettingen grotendeels in aanmerking komen als reservoirgesteente voor lage temperatuur-aardwarmtewinning. De zandige kwartaire afzettingen komen ten dele ook in aanmerking als reservoirgesteente voor grootschalige warmte-opslag. Op vele plaatsen ontbreken echter voldoende afsluitende lagen en/of is de permeabiliteit in vertikale richting dusdanig hoog dat grootschalige warmte-opslag niet verantwoord is, dan wel gepaard zal gaan met onaanvaardbaar grote warmteverliezen. Met behulp van gegevens opgenomen in bestaande publikaties van de Rijks Geologische Dienst en de Dienst Grondwaterverkenning TNO kan voor vrijwel elke regio in Nederland vastgesteld worden of de boven-kwartaire afzettingen in principe in aanmerking komen als reservoirgesteente voor grootschalige opslag van warmte. Uiteraard dient voor elke lokatie waar met name grootschalige warmte-opslag wordt overwogen een gedegen geo(hydro)logisch onderzoek te worden uitgevoerd om de reservoirkenmerken met voldoende nauwkeurigheid vast te stellen.

4.6 Zoutgehalte van het in de reservoirzanden aanwezige grond-/formatiewater

Een kaart van Nederland waarop de diepte tot het diepste zout-brak grensvlak (150 mg Cl^-/l) is aangegeven, is als bijlage 14 bij dit

rapport opgenomen. Het lijnenbeeld is vervaardigd op basis van informatie verkregen uit analysen van grondwatermonsters, boorgatmetingen en geo-elektrische metingen. Uit de kaart blijkt dat de diepteligging van het zoet-brak grensvlak sterk varieert. Vrijwel overal wordt nabij het maaiveld zoet water met een chloridegehalte tussen ca. 5 en 50 mg/l aangetroffen, terwijl op min of meer grote diepte het grond-/formatiewater een chloridegehalte heeft dat vergelijkbaar is met zeewater (meer dan 30 g Cl^-/l).

De grootste diepten tot het zoet-brak grensvlak komen voor in gebieden waar sprake is van infiltratie van water; ook in gebieden waar de mariene afzettingen diep gelegen zijn ligt het grensvlak plaatselijk op een aanzienlijke diepte. Infiltratie komt voor in zones waar de grondwaterstijghoogten relatief hoog zijn ten opzichte van de stijghoogten in de lager gelegen gebieden. Deze relatief hoge grondwaterstijghoogten veroorzaken, volgens het principe van Badon Gyben-Herzberg, een versterkte infiltratie van regenwater, waardoor door verdringing van zout grondwater een zoet-water lens ontstaat, die tot grote diepte kan reiken (400 à 500 m - NAP).

Als infiltratiegebieden zijn op de kaart duidelijk te herkennen: de Veluwe, de Utrechtse Heuvelrug, de heidegebieden ten zuiden van Eindhoven, de duingebieden van Noord- en Zuid-Holland en het opgestuwde gebied van Gaasterland in het zuiden van de provincie Friesland. Ook op de Peelhorst - een gebied met relatief hoge grondwaterstijghoogten - zou tot op grote diepte zoet grondwater moeten voorkomen. Dit is echter niet het geval omdat op de Peelhorst mariene, fossiel zout water bevattende, afzettingen ondiep gelegen zijn; dit als gevolg van tektonische activiteit. Deze mariene afzettingen zijn tot op enige diepte verzoet en waarschijnlijk vindt ook thans de verzoeting voortgang, hoewel langzaam als gevolg van de lithologische samenstelling van de afzettingen. In Twente is het zoet-brak grensvlak om dezelfde redenen eveneens relatief ondiep gelegen. Tevens komen in het noordoosten van Nederland rond zoutkoepels opwelvingen van het zoet-brak grensvlak voor. Op de kaart zijn deze te herkennen als cirkel- en ovaalvormige anomaliën.

In de laag gelegen gebieden van Nederland is het grondwater op geringe diepte over het algemeen zout of brak. In deze gebieden zijn ook rivierafzettingen - die oorspronkelijk zoet grondwater bevat hebben - als gevolg van de regelmatig terugkerende transgressies van de zee gedurende het Eemien en het Holoceen in belangrijke mate verzilt. Rond met name het IJsselmeer hebben de transgressies geleid tot zogenaamde inversies. Hier komen in uitgestrekte gebieden zout en brak grondwater boven zoet grondwater voor. Het zoete grondwater is hier over het algemeen aanwezig onder slecht doorlatende lagen.
Voor meer gedetailleerde gegevens betreffende de verdeling van zoet, brak en zout grondwater wordt verwezen naar de gegevens opgenomen in onder meer inventarisatierapporten en rapporten inzake geo-elektrisch onderzoek, uitgebracht door de Dienst Grondwaterverkenning TNO. In deze rapporten en in de gegevensbestanden van met name het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne (voorheen het RID) zijn tevens gegevens opgenomen betreffende andere chemische eigenschappen (zoals Ca/Mg-gehalten) van het grondwater die van belang zijn bij grootschalige opslag van warmte en bij lage temperatuur-aardwarmtewinning.

4.7 Toelichting op de bijlagen

De bijlagen 2 t/m 16 zijn compilaties van eerder gepubliceerde profielen, dikte- en dieptekaarten. Deze profielen en kaarten werden oorspronkelijk gepubliceerd als bijlagen bij deelrapporten waarin de inventarisatie van tertiaire en onder-kwartaire zandige afzettingen in Noord-, Midden- en Zuid-Nederland gerapporteerd werd.
De oorspronkelijke kaarten tonen een (diepte- c.q. dikte-) contourbeeld gesuperponeerd op een gedetailleerde topografische ondergrond; schaal 1 : 250.000. Het reduceren van deze kaarten naar een schaal 1 : 500.000 en een ondergrond met een zeer beperkte topografie heeft voor de verschillende niveaus handzame kaarten opgeleverd, maar uiteraard ook tot meer globale kaartbeelden geleid.
De samenstellers van het onderhavige rapport menen door het bijsluiten van deze bijlagen met een gelimiteerde nauwkeurigheid een 'quick-look' in de Nederlandse ondergrond te verschaffen, maar verwijzen naar de (deel)rapporten en meer gedetailleerde onderzoeken indien een (proef)project voor aardwarmtewinning of warmte-opslag op een bepaalde lokatie in Nederland wordt overwogen.

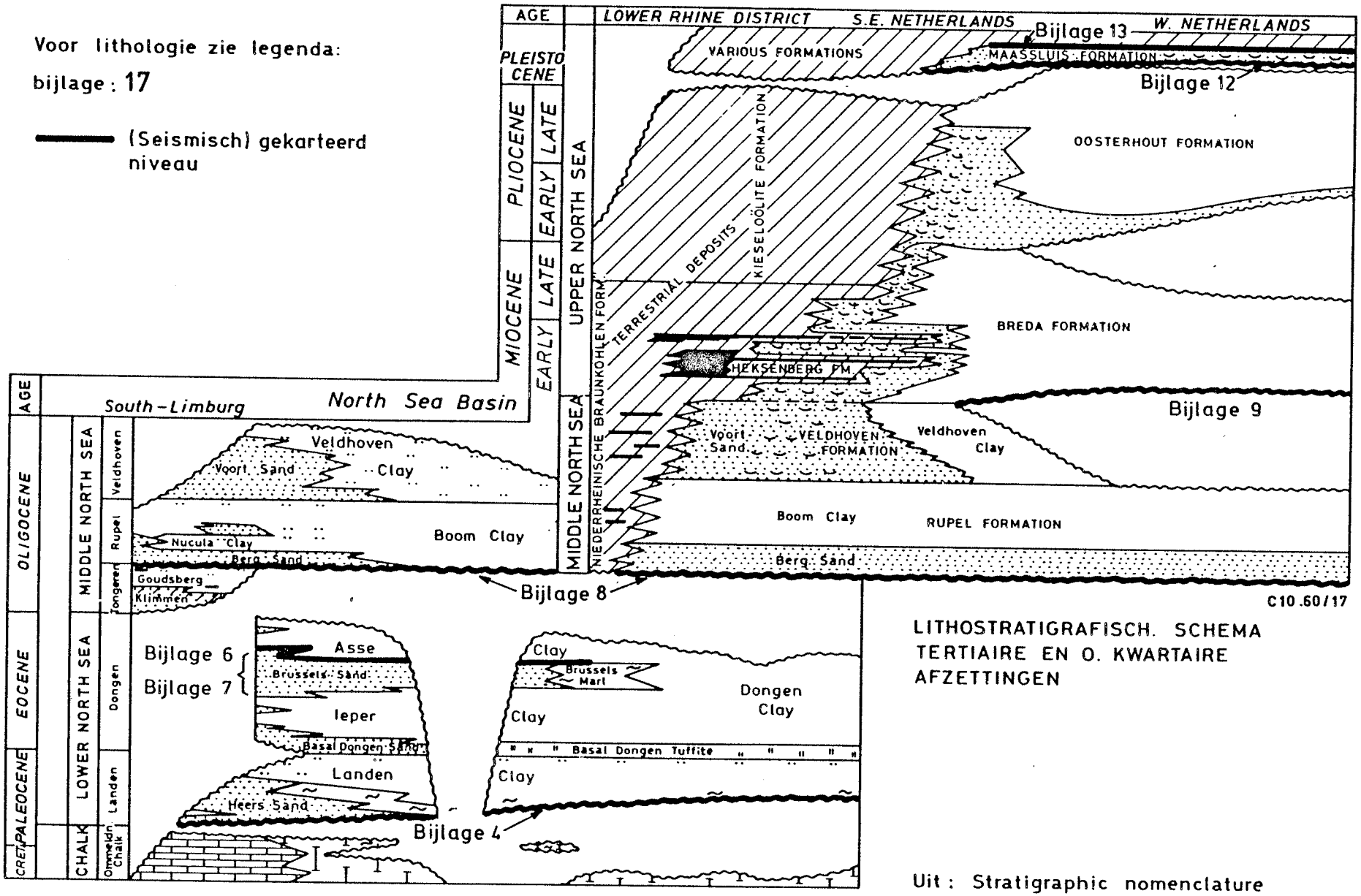


Fig. 4.30 Stratigrafisch schema van de Onder, Midden en Boven Noordzee Groepen, waarin aangegeven de (seismisch) gekarteerde niveaus met bijlagenummer

Voorts dient opgemerkt te worden dat de bijlagen 4, 6, 8, 9, 11 (zuid), 12 en 13 een dieptecontourbeeld weergeven dat vervaardigt werd met behulp van informatie uit boringen (van olie/gas en zoutindustrie); zie bijlage 2, en interpretatie van een seismisch net waar meer dan 14.000 km (reflectie-) seismische lijn voor geselecteerd werd; zie bijlage 3.
De bijlagen 5 en 10 geven de regionale verbreiding van reservoirzanden (mogelijk geschikt voor opslag/winning) weer, gesuperponeerd op het dieptecontourbeeld van het dichtstbijgelegen seismisch gekarteerde niveau; vergelijk ook Fig. 4.30.
Bijlagen 7 en 11 (noord) representeren contourkaarten waar de dikte van twee pakketten op grond van putinformatie weergegeven zijn.
Op de bijlagen 15 en 16 zijn vier dwarsdoorsneden (profielen) door Nederland weergegeven.

LITERATUUR

Adrichem Boogaert, H.A. van et al., 1983
The development of the Zechstein in The Netherlands. Geologie en Mijnbouw, vol 62, nr. 1, 1983, pp. 83-92.

Baaren, J.P. van, 1978
Quick-look permeability estimates using sidewall samples and porosity logs. Koninklijke Shell Exploratie en Produktie Laboratorium, Rijswijk, Publication 534.

Bosch, M van den, G.C. Cádee & A.N. Jansen, 1975
Lithostratigraphical and biostratigraphical subdivision of Tertiary deposits (Oligocene-Pliocene) in the Winterswijk-Almelo region (eastern part of The Netherlands). Scripta Geologica 29.

Craig, F.F., 1971
The reservoir engineering aspects of waterflooding. Monograph vol. 3 of Henry L. Doherty, Series of Soc. Pet. Eng. of AIME.

Dalfsen, W. van, 1982
Het thermisch en hydraulisch gedrag van een opslagsysteem met heet water in het Brussels Zand onder Breda volgens eenvoudige modellen. Dienst Grondwaterverkenning TNO, Delft (feb. 1982), rapportnr. OS 82-04.

Dalfsen, W. van, 1982
Het thermohydraulisch gedrag van heet water in een poreus ondergronds opslagreservoir.
Dienst Grondwaterverkenning TNO, Delft (nov. 1982), rapportnr. OS 82-23.

Dalfsen, W. van, 1983
Het ondiep ondergrondse temperatuurveld in Nederland.
Dienst Grondwaterverkenning TNO, Delft, rapportnr. OS 83-31.

Dalfsen, W. van, 1984
Tijdelijke warmte-opslag in ondergrondse watervoerende lagen. Dienst Grondwaterverkenning TNO, Delft, (aug. 1984), rapportnr. OS 84-21.

Dam, A. ten, 1944
Die stratigraphische Gliederung des niederländischen Paläozäns und Eozäns nach Foraminiferen (mit Ausnahme von Süd-Limburg).
Mededelingen van de Geologische Stichting, serie C-V, nr. 3.

Dienst Grondwaterverkenning TNO
Grondwaterkaart van Nederland; inventarisatierapporten en rapporten inzake geo-elektrisch onderzoek; kaartbladen 1 t/m 62, onderzoek gereed of in uitvoering.

Despois, J. & F. Nougarède, 1979

Faisabilité du stockage souterrain de chaleur. Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) et Société Nationale Elf-Aquitaine (SNEA), Paris. Tome 1 et 2.

Doorn, Th.H.M. van & H. Speelman, 1984

Geologische en hydrogeologische inventarisatie van tertiaire en onder-kwartaire afzettingen in Noord-Nederland t.b.v. ondergrondse opslag van warm water.

Rijks Geologische Dienst, Haarlem (1984), rapportnr. 84KARO8EX.

Doughty, C. et al., 1981

A study of ATES thermal behavior using a steady flow model. Earth Sciences Division Lawrence Berkely Laboratory LBL-11029. University of California, Berkely.

Gringarten, A.C. & J.P. Sauty, 1975

A theoretical study of heat extraction from aquifers with uniform regional flow. J. Geoph. Res., vol. 80, no. 35, pp. 4956-4962.

Hagelskjaer, J.A.L. & J. Mortensen, 1983

Underground heat storage in Hørsholm, Denmark; demonstration plant and experience. Int. Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice, Stockholm, pp. 232-239.

Hardenbol, J. & C.W. Berggren, 1978

A new paleogene numerical time scale. Am. Assoc. Pet. Geol., Stud. Geol. 6, pp. 213-234.

Hellström, G. et al., 1979

Heat storage in aquifers, buoyancy flow and thermal stratification problems. Lund Institute of technology, Dept. of Math. Phys., Lund, Zweden.

Heybroek, P., 1974

Explanation to tectonic maps of The Netherlands. Geologie en Mijnbouw 53, pp. 43-50.

Keizer, J. & W.J. Letsch, 1963

Geology of the Tertiary in The Netherlands. Verh. Kon. Ned. Geol. Mijnbouwk. Gen., Geol. Series 21-2, pp. 147-172.

Letsch, W.J. & W. Sissingh, 1983

Tertiary stratigraphy of The Netherlands. Geologie en Mijnbouw, vol. 62, no. 2, pp. 305-318.

Leyzers Vis, C.I., 1982

Geologische inventarisatie van tertiaire afzettingen in Zuid-Nederland ten behoeve van ondergrondse opslag en winning van warmte. Rijks Geologische Dienst, Haarlem (1982), rapportnr. 820S22.

Leyzers Vis, C.I. & H. Speelman, 1983

Geologische en hydrogeologische inventarisatie van tertiaire en onder-kwartaire afzettingen in Midden-Nederland t.b.v. ondergrondse opslag en winning van warm water.

Rijks Geologische Dienst, Haarlem (1983), rapportnr. 83KA20EX.

Miserez, J.J., 1980

Physiochemie des eaux de Dorigny; A, Inventaire des difficultés possibles; B, Prévision concernant le compartement chimique des eaux de la nappe de Dorigny utilisée comme accumulator de chaleur. SPEOS. Lausanne.

Molz, F.J., J.C. Warman & J.E. Jones, 1978

Aquifer storage of heated water; I, a field experiment. Ground Water, vol. 16, no. 4, pp. 234-241.

Oltshoorn, T.N., 1983

Grootschalige en seizoensmatige opslag van warmte in kwartaire aquifers. Verwachte gevolgen voor het milieu en andere belangen. Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening.

Pacific Northwest Laboratory, 1982

Underground energy storage program. Annual report: Batelle Memorial Institute.

Prins, S., H.M. van Montfrans & P. van Rooyen, 1984

Inventarisatie van de paleozoïsche kalksteen (Dinantien) en de Chalk Group (Krijt) in Nederland t.b.v. de winning van aardwarmte; warmtedoorvoer- en temperatuurkaarten; aanwezige en winbare hoeveelheid aardwarmte.

Rijks Geologische Dienst, rapportnr. 84KAR16EX.

Rijks Geologische Dienst

Nieuwe geologische kaart van Nederland 1 : 50 000 met toelichting en Geologische overzichtskaarten van Nederland 1 : 600 000 met toelichting.

Sanneman, in Trusheim, F. (1957)

Über Halokinese und ihre Bedeutung für die strukturelle Entwicklung Norddeutschlands. Zschr. deu. geol. Ges. 109, pp. 2.111-2.157.

Sauty, J.P., A.C. Gringarten, A. Menjoz & P.A. Landel

Sensible energy storage in aquifers; I, theoretical study. Water Resources Research, vol. 18, no.2, pp. 254-252.

Schoute, H.R., 1982

Hydrogeologische inventarisatie van tertiaire aquifers in Zuid-Nederland ten behoeve van ondergrondse opslag van warm water. Dienst Grondwaterverkenning TNO, Delft (1982),rapportnr. OS 82-22.

Speelman, H., 1983

Ontwerp van een systeem voor warmte-opslag in een ondergronds poreus en permeabel reservoir.

Dienst Grondwaterverkenning TNO, Delft (1983),rapportnr. OS 83-03.

Speelman, H. & J.N. Breunese, 1985

Permeabiliteit, porositeit en kleigehalte van tertiaire en onderkwartaire afzettingen in Nederland.

Rijks Geologische Dienst, Haarlem (1985), rapportnr. 84KAR13EX.

Speelman, H. & J.N. Breunese, 1985

Determination of porosity and permeability of low-permeable unconsolidated marine Tertiary deposits in The Netherlands. Proc. 19th Int. Congress of IAH, Hydrogeology of rocks of low permeability, Tucson, USA.

Thiadens, A.A., 1968

Geologie van het zout. In: Het zout der aarde. KNZ, Hengelo.

Tsang, C.F. & D. Hopkins, 1982

Aquifer thermal energy storage; a survey. Geol. Soc. America Special Paper 189: Recent trends in Hydrogeology.

Vail, P.H. & R.M. Michum, 1979

Global cycles of relative changes of sea level from seismic stratigraphy. Am. Assoc. Pet. Geol. Mem. 26, pp. 469-472.

Visser, W.A., ed. 1980

Geological nomenclature. Royal Geological and Mining Society of The Netherlands. Scheltema & Holkema, Utrecht.

Zagwijn, W.H., 1979

Early and Middle Pleistocene coastlines in the southern North Sea basin. In E. Oele, R.T.E. Schüttenhelm & A.J. Wiggers (editors). The Quaternary History of the North Sea, pp. 31-42.

Act. Univ. Ups. Symp. Univ. Ups. Annum Quingentesium Celebrantis 2 Upsala. ISBN 91-554-0495-2.

Zagwijn, W.H. & J.W. Chr. Doppert, 1978

Upper Cenozoic of the southern North Sea Basin: paleoclimatic and paleogeographic evolution. Geologie en Mijnbouw 57, pp. 577-588.

Ziegler, P.A., 1975

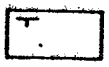
Geologic evolution of the North Sea and its tectonic framework. Bull. Am. Ass. Pet. Geol. 59, pp. 1073-1097.

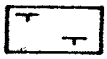
Ziegler, P.A., 1978

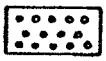
North-Western Europe: tectonics and basin development. Geologie en Mijnbouw, vol. 57, pp. 589-626.

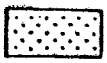
LEGENDA PROFIELEN

bijlage 17

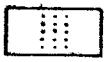

bros


gekonsolideerd/
versteend

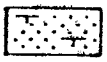

grind


zand

zandig

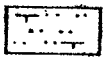

zeer zandig

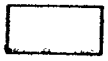
ietwat zandig


zandsteen

silt

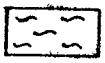
siltig

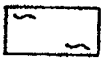

siltsteen



klei

kleiig


mergel


mergelig

kalksteen

dolomiet

krijt

bruinkoolhoudend

gehele fossielen (ongedefinieerd)

fossielgruis („ „ „)

bryozoën

foraminiferen

gastropoden

pelecypoden

mollusken

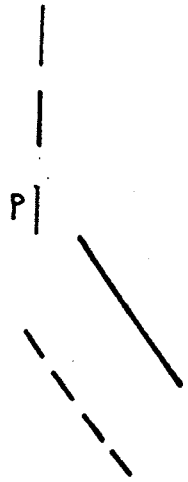
plantenresten

houtresten

bioturbatie

HDN-1
gc

code diepboring.



glaukoniethoudend

rijk aan glaukoniet

pyriethoudend

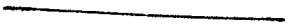
breuk

breuk onzeker

voor de volgende symbolen geldt:

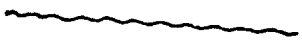
seismisch gekarteerd

niet seismisch gekarteerd



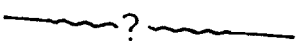
normaal kontakt tussen
lithostratigrafische eenheden

" " " " diepteligging onzeker



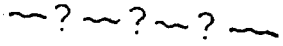
hiaat tengevolge van
non-depositie of erosie

" " " " diepteligging onzeker

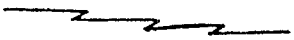


overgang tussen lithostrati-
grafische eenheden

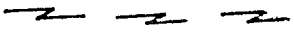
aanwezigheid
hiaat onzeker



" " " " aanwezigheid hiaat en
diepteligging onzeker

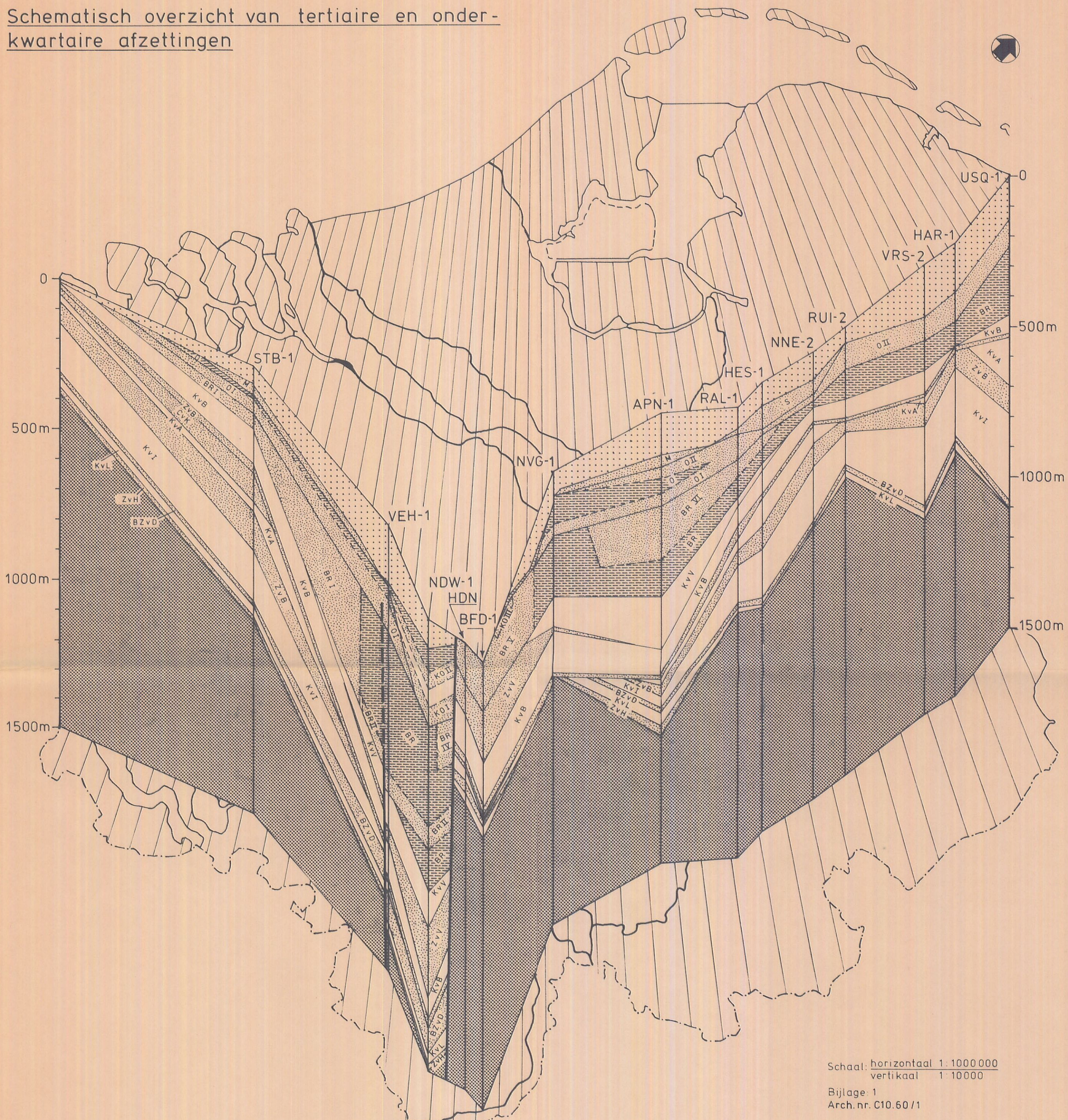


laterale overgang tussen
lithostratigrafische eenheden



" " " " diepteligging onzeker

Schematisch overzicht van tertiaire en onderkwartaire afzettingen



Schaal: horizontaal 1:1000000
vertikaal 1:10000

Bijlage: 1
Arch. nr. C10.60/1

Tertiair
- zandige afzettingen
- kleiige afzettingen
- klei

Kwartair

Pre-Tertiair

LEGENDA

M	Formatie van Maassluis	KvV	Klei van Veldhoven
KO I	Kiezeloöliet Formatie: Grind van Waubach en Waubach Zanden	ZvV	Zand van Voort
KO II	Kiezeloöliet Formatie Schinveld Zanden	KvB	Klei van Boom
KO III	Kiezeloöliet Formatie: Venlo Zanden	ZvB	Zand van Berg
S	Formatie van Scheemda	CvK	Complex van Kallo
O	Formatie van Oosterhout	KvA	Klei van Asse
O I	Formatie van Oosterhout: Zandlichaam I	ZvB	Zand van Brussel
Q II	Formatie van Oosterhout Zandlichaam II	KvI	Klei van Ieper
BR	Formatie van Breda	BZvD	Basaal Zand van Dongen
BR I	Formatie van Breda: Zandlichaam I	KvL	Klei van Landen
BR II	Formatie van Breda: Zandlichaam II	ZvH	Zand van Heers
BR IV	Formatie van Breda: Zandlichaam IV		
BR V	Formatie van Breda: Zandlichaam V		
BR VI	Formatie van Breda: Zandlichaam VI		

Samensteller: N. Salomons
Getekend: A. Koers

Lokatiekaart boringen

Legenda

BRG-1 Diepboring met RGD-code

A — A' Tracé profiel A - A'

180 / 450 Nieuw - Amersfoort coördinaat - systeem

N

RIJKS GEOLOGISCHE DIENST HAARLEM 1985

BIJLAGE 2 RAPPORT Nº.: 85KAR02EX

SAMENST.: Th.v.Doorn / C. Leyzers Vis GET.: A.H.K. ARCHIEF Nº.: C10.60/2

1 : 500.000

0 5 10 20 30 km

Lokatiekaart seismiek

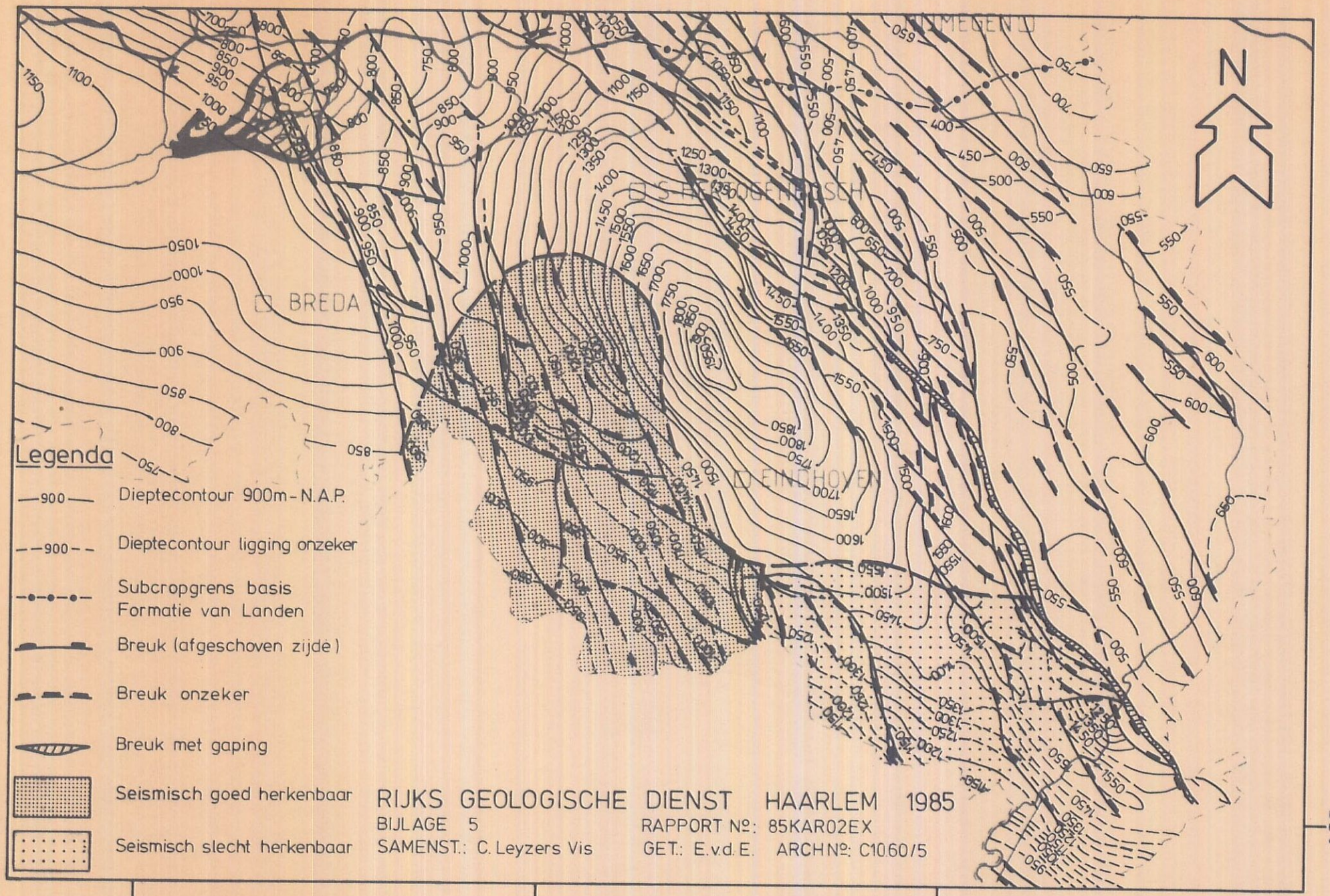
RIJKS GEOLOGISCHE DIENST HAARLEM 1985

BIJLAGE 3 RAPPORT Nº.: 85KAR02EX

SAMENST.: Th.v.Doorn / C.Leyzers Vis GET.: A.H.K. ARCHIEF Nº.: C10.60/3

Diepteligging basis Tertiair

Verbreiding Basaal Zand van Dongen



Diepteligging bovenkant Zand van Brussel

N

Legenda

- Dieptecontour 900 m - N.A.P.
- Dieptecontour ligging onzeker
- Subcrop - grens bovenkant
- Subcrop - grens basis
- Breuk (afgeschoven zijde)
- Breuk onzeker
- Begrenzing van glaciale stuwing

LEEUWARDEN
GRONINGEN
ASSEN
ZWOLLE
ALKMAAR
HAARLEM
AMSTERDAM
UTRECHT
DEN HAAG
ROTTERDAM
ARNHEM
NIJMEGEN
'S-HERTOGENBOSCH
BREDA
MIDDELBURG
EINDHOVEN
MAASTRICHT

RIJKS GEOLOGISCHE DIENST HAARLEM 1985

BIJLAGE 6 RAPPORT Nº: 85KAR02EX

SAMENST.: Th.v. Doorn / C. Leyzers Vis GET.: E.v.d. E. ARCHIEF: C10.60/6

1 : 500.000

0 5 10 20 30 km

Diktekaart Zand van Brussel

N

Legenda

- 50 — Diktecontour
- 50 — Diktecontour ligging onzeker
- Subcrop - grens bovenkant
- Subcrop - grens basis
- Breuk (afgeschoven zijde)
- Breuk onzeker
- Begrenzing van glaciale stuwing

LEEUWARDEN
GRONINGEN
ASSEN
ALKMAAR
ZWOLLE
HAARLEM
AMSTERDAM
UTRECHT
DEN HAAG
ARNHEM
ROTTERDAM
NIJMEGEN
'S-HERTOGENBOSCH
BREDA
MIDDELBURG
EINDHOVEN
MAASTRICHT

1 : 500.000
0 5 10 20 30 km

RIJKS GEOLOGISCHE DIENST HAARLEM 1985

BIJLAGE 7 RAPPORT №: 85KAR02EX

SAMENST.: Th.v.Doorn / C.Leyzers Vis GET.: E.v.d.E. ARCHIEF: C10.60 / 7

Diepteligging basis Formatie van Rupel

RIJKS GEOLOGISCHE DIENST HAARLEM 1985

BIJLAGE 8 RAPPORT Nº: 85KAR02EX

SAMENST.: Th.v.Doorn / C.Leyzers Vis GET.: E.v.d.E. ARCHIEF Nº: C10.60/8

Diepteligging basis Formatie van Breda

N

Legenda

- 900 — Dieptecontour 900 m - N.A.P.
- 900 — Dieptecontour ligging onzeker
- Subcrop - grens basis
- Breuk (afgeschoven zijde)
- Breuk onzeker
- Breuk met gaping
- Begrenzing van glaciale stuwing

LEEUWARDEN
GRONINGEN
ASSEN
ALKMAAR
AMSTERDAM
ZWOLLE
DEN HAAG
ROTTERDAM
ARNHEM
NIJMEGEN
BREDA
MIDDELBURG
EINDHOVEN
MAASTRICHT

RIJKS GEOLOGISCHE DIENST HAARLEM 1985

BIJLAGE 9 RAPPORT Nº: 85KAR02EX

SAMENST.: Th.v.Doorn / C.Leyzers Vis GET.: E.v.d.E. ARCHIEF: C10.60/9

1 : 500.000

0 5 10 20 30 km

Verbreiding en diepteligging van zandige eenheden binnen Formatie van Breda

Legenda

- 850 — Dieptecontour 850m - N.A.P.
- 700 — Dieptecontour ligging onzeker
- Subcrop-grens basis Formatie van Breda
- Breuk (afgeschoven zijde)
- Breuk onzeker
- Breuk met gaping
- Basaal zandpakket, seismisch karteerbaar
- Zandlichaam binnen Formatie van Breda seismisch karteerbaar
- Zand binnen Formatie van Breda en Zand van Voort onwikkeld als kleiig zand
- Formatie van Breda ontwikkeld als grof glaukonietzand
- Diepteligging basis van zandige top Formatie van Breda in centraal Nederland, seismisch karteerbaar
- Zandige pakketten aanwezig, niet karteerbaar

LEEUWARDEN · GRONINGEN · ASSEN · ZWOLLE · HAARLEM · AMSTERDAM · UTRECHT · DEN HAAG · ROTTERDAM · ARNHEM · NIJMEGEN · BREDA · MIDDELBURG · MAASTRICHT

RIJKS GEOLOGISCHE DIENST HAARLEM 1985

BIJLAGE 10 RAPPORT Nº: 85KAR02EX

SAMENST.: Th.v. Doorn / C. Leyzers Vis GET.: E.v.d.E. ARCHIEF Nº: C10.60/10

1 : 500.000

0 5 10 20 30 km

Dikte en diepteligging van :
Zandlichaam in Formatie van Oosterhout (Groningen)
Zand van Voort (N. Brabant / Limburg)

N

Legenda

- 40 — Diktecontour
- 40 — Diktecontour onzeker
- 1400 — Dieptecontour 1400 m - N.A.P.
- 1400 — Dieptecontour ligging onzeker
- Breuk (afgeschoven zijde)
- Breuk onzeker
- Breuk met gaping
- Seismisch karteerbaar
- Seismisch niet karteerbaar bekend uit boringen

LEEUWARDEN
GRONINGEN
ASSEN
ALKMAAR
ZWOLLE
HAARLEM
AMSTERDAM
UTRECHT
DEN HAAG
ARNHEM
ROTTERDAM
NIJMEGEN
BREDA
MIDDELBURG
EINDHOVEN
MAASTRICHT

RIJKS GEOLOGISCHE DIENST HAARLEM 1985

BIJLAGE 11 RAPPORT Nº: 85KAR02EX

SAMENST.: Th.v.Doorn / C.Leyzers Vis GET.: E.vd.E. ARCHIEF Nº.: C10.60/11

1 : 500.000
0 5 10 20 30 km

Diepteligging basis Formatie van Maassluis

N

Legenda

- 250 — Dieptecontour 250 m - N.A.P.
- 250 — Dieptecontour ligging onzeker
- Verbreidingsgrens Formatie van Maassluis
- Breuk (afgeschoven zijde)
- Breuk onzeker
- Formatie van Maassluis door erosie voor een deel of geheel verdwenen
- Gebied waar overwegend zandige fluviatiele Oud Pleistocene afzettingen (Formatie van Tegelen) uitwiggen in de Formatie van Maassluis

LEEUWARDEN
GRONINGEN
ASSEN
ALKMAAR
ZWOLLE
HAARLEM
AMSTERDAM
UTRECHT
DEN HAAG
ROTTERDAM
ARNHEM
NIJMEGEN
'S-HERTOGENBOSCH
BREDA
EINDHOVEN
MAASTRICHT

RIJKS GEOLOGISCHE DIENST HAARLEM 1985

BIJLAGE 12 RAPPORT Nº.: 85KAR02EX

SAMENST.: J. Breeuwer / Th.v. Doorn GET.: E.v.d. E. ARCHIEF Nº.: C10.60/12

1 : 500.000

0 5 10 20 30 km

Diepteligging bovenkant Formatie van Maassluis

Legenda

- Dieptecontour 220m – N.A.P.
- Dieptecontour ligging onzeker
- Verbreidingsgrens Formatie van Maassluis
- Breuk (afgeschoven zijde)
- Breuk onzeker
- Formatie van Maassluis door erosie voor een deel of geheel verdwenen

LEEUWARDEN
GRONINGEN
ASSEN
ALKMAAR
HAARLEM
AMSTERDAM
ZWOLLE
UTRECHT
DEN HAAG
ROTTERDAM
ARNHEM
NIJMEGEN
S-HERTOGENBOSCH
BREDA
MIDDELBURG
EINDHOVEN
MAASTRICHT

1 : 500.000
0 5 10 20 30 km

RIJKS GEOLOGISCHE DIENST HAARLEM 1985

BIJLAGE 13 RAPPORT Nº: 85KAR02EX

SAMENST.: J. Breeuwer / Th.v. Doorn GET.: E.v.d.E. ARCHIEF Nº.: C10.60/13

Diepte tot het diepste zoet - brak grensvlak (150 mg Cl^-/l)

N

Legenda

150 — Dieptecontour 150 m - N.A.P.

150 - - - Dieptecontour ligging onzeker

Gebieden waar zout (Cl^- > 1000 mg/l) of brak (150 < Cl^- < 1000 mg/l) grondwater boven zoet grondwater voorkomt. In deze gebieden is de zoet - brak - zout verdeling dermate complex dat een weergave met dieptelijnen soms niet mogelijk is.

LEEUWARDEN
GRONINGEN
ASSEN
ALKMAAR
HAARLEM
AMSTERDAM
ZWOLLE
DEN HAAG
UTRECHT
ARNHEM
ROTTERDAM
NIJMEGEN
S-HERTOGENBOSCH
BREDA
MIDDELBURG
EINDHOVEN
MAASTRICHT

DIENST GRONDWATERVERKENNING TNO 1985

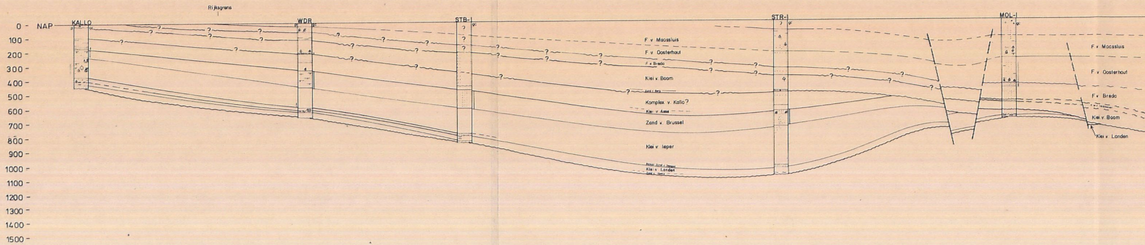
BIJLAGE 14 RAPPORT Nº: 85KAR02EX

SAMENST.: W. Senden GET.: E.v.d.E. ARCH.: C10.60/14

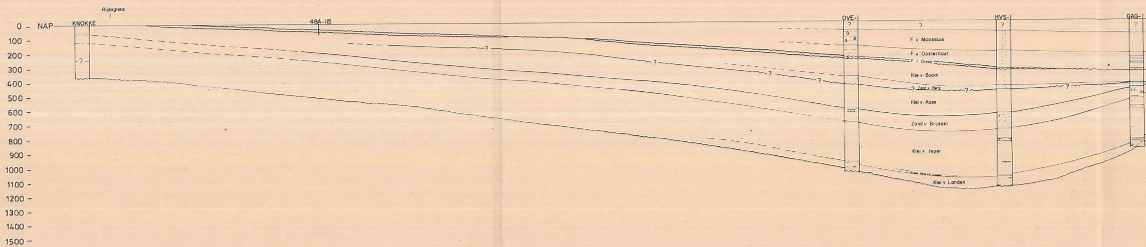
1 : 500.000

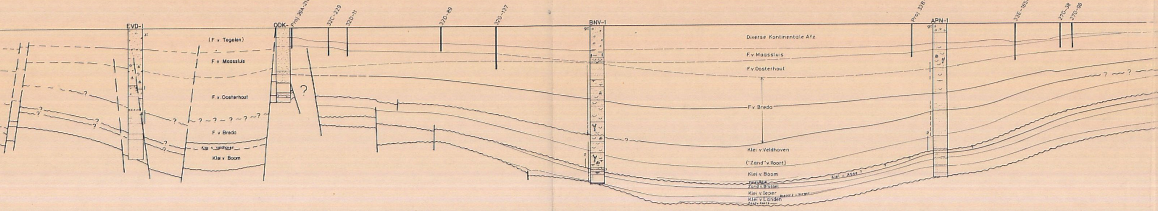
0 5 10 20 30 km

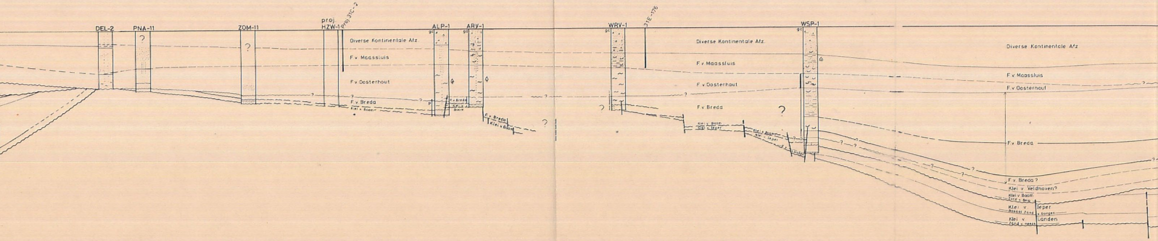
B

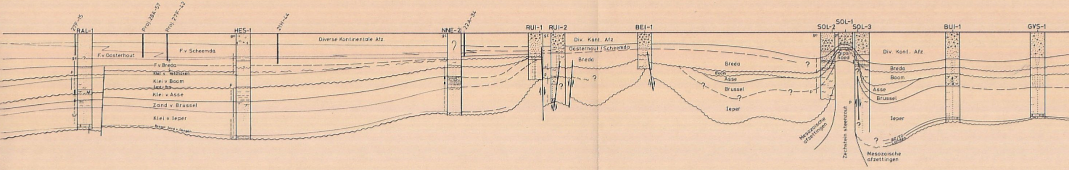

Rijksgrens
0 -
100 -
200 -
300 -
400 -
500 -
600 -
700 -
800 -
900 -
1000 -
1100 -
1200 -
1300 -
1400 -
1500 -
NAP
KALLO
WDR
STB-I
STR-I
MOL-I
?
F v. Moosluis
F v. Oosterhout
F v. Breda
Klei v. Boom
Zand v. Berg
Komplex v. Kallo?
Klei v. Asse
Zand v. Brussel
Klei v. Ieper
Basaal Zand v. Dongen
Klei v. Landen
Zand v. Heers
F v. Moosluis
F v. Oosterhout
F v. Breda
Klei v. Boom
Klei v. Landen

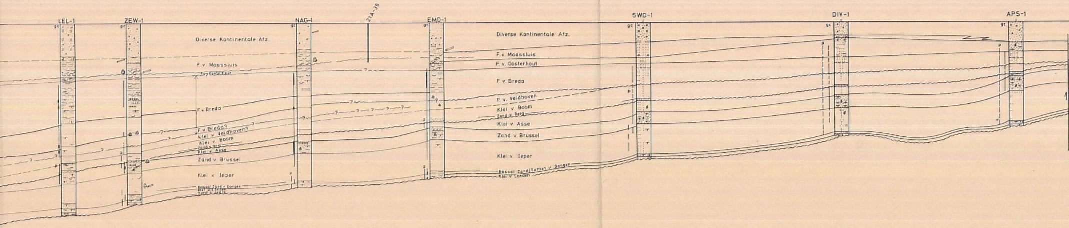
A

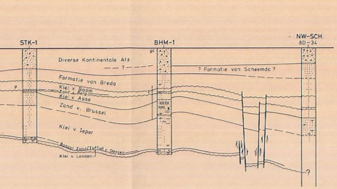

Rijksgrens
0 -
100 -
200 -
300 -
400 -
500 -
600 -
700 -
800 -
900 -
1000 -
1100 -
1200 -
1300 -
1400 -
1500 -
NAP
KNOKKE
48A-115
OVE-I
HVS-I
GAG-I
?
F v. Moosluis
F v. Oosterhout
F v. Breda
Klei v. Boom
Zand v. Berg
Klei v. Asse
Zand v. Brussel
Klei v. Ieper
Basaal Zand van Dongen
Klei v. Landen

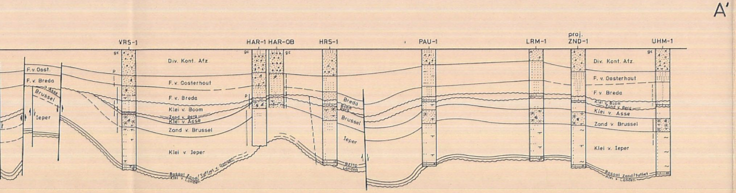

EVD-1
ODK-
Proj 39A-210
32C-229
32D-11
32D-89
32G-137
BNV-1
Proj 33B-270
APN-1
33E-185/180
27G-38
27G-98
gc
(F v Tegelen)
F v Maassluis
F v Oosterhout
F v Breda
Klei v Veldhoven
Klei v Boom
?
Diverse Kontinentale Afz.
F v Maassluis
F v Oosterhout
F v Breda
Klei v Veldhoven
("Zand" v Voort)
Klei v Boom
Klei v Asse ?
Zand v Brussel
Klei v Ieper
Klei v Landen
P

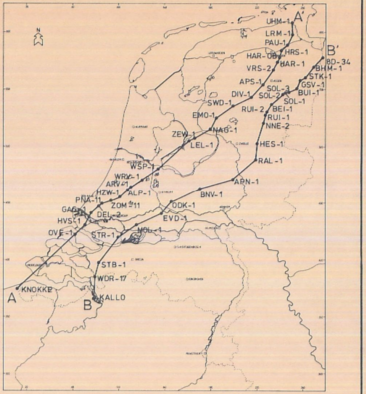

DEL-2
PNA-11
ZOM-11
proj HZW-1
Proj 31C-2
ALP-1
ARV-1
WRV-1
31E-176
WSP-1
gc
?
Diverse Kontinentale Afz.
F v Maassluis
F v Oosterhout
F v Breda
Klei v Boom
P
F v Breda
Klei v Boom
Klei v Boom
Klei v Ieper
Klei v Boom
Klei v Ieper
F v Landen
Diverse Kontinentale Afz
F v Maassluis
F v Oosterhout
F v Breda
F v Breda ?
Klei v Veldhoven?
Klei v Boom
Zand v Berg
Klei v Ieper
Basaal Zand v Dongen
Klei v Landen
Zand v Heers


27F-15
RAL-1
Proj. 28A-57
Proj. 27F-42
HES-1
21H-44
NNE-2
22A-34
RUI-1
RUI-2
BEI-1
SOL-2
SOL-1
SOL-3
BUI-1
GVS-1
gc
Diverse Kontinentale Afz.
F.v. Scheemda
F.v. Oosterhout
F.v. Breda
Klei v. Veldhoven
Klei v. Boom
Zand v. Berg
Klei v. Asse
Zand v. Brussel
Klei v. Ieper
Basaal Zand v. Dongen
Div. Kont. Afz
Oosterhout / Scheemda
Breda
Boom
Asse
Brussel
Ieper
gips-hoed
Mesozoische afzettingen
Zechstein steenzout
BZ/TD
Landen
p
?


LEL-1
ZEW-1
NAG-1
21A-38
EMO-1
SWD-1
DIV-1
APS-1
gc
Diverse Kontinentale Afz.
F.v. Maassluis
F.v. Oosterhout
F.v. Breda
F.v. Breda?
Klei v. Veldhoven?
F.v. Veldhoven
Klei v. Boom
Zand v. Berg
Klei v. Asse
Zand v. Brussel
Klei v. Ieper
Basaal Zand v. Dongen
Basaal Zand/Tufiet v. Dongen
Klei v. Landen
Zand v. Heers
p
?


B'
STK-1
BHM-1
NW-SCH.
BD-34
gc
Diverse Kontinentale Afz.
?
? Formatie van Scheemda ?
Formatie van Breda
p
Klei v. Boom
Zand v. Berg
Klei v. Asse
Zand v. Brussel
Klei v. Ieper
Basaal Zand/Tufliet v. Dongen
Klei v. Landen
?


A'
VRS-1
HAR-1
HAR-OB
HRS-1
PAU-1
LRM-1
proj.
ZND-1
UHM-1
gc
p
F. v. Oost.
F. v. Breda
Asse
Brussel
Ieper
Div. Kont. Afz.
F. v. Oosterhout
F. v. Breda
Klei v. Boom
Zand v. Berg
Klei v. Asse
Zand v. Brussel
Klei v. Ieper
Basaal Zand/Tufliet v. Dongen
Klei v. Landen
Breda
Boom
Berg
Brussel
Ieper
BZITD
Landen
Div. Kont. Afz.
F. v. Oosterhout
F. v. Breda
Klei v. Boom
Zand v. Berg
Klei v. Asse
Zand v. Brussel
Klei v. Ieper
Basaal zand/tufliet
Klei v. Landen


N
A'
B'
UHM-1
LRM-1
PAU-1
HRS-1
HAR-OB
HAR-1
BD-34
BHM-1
STK-1
GSV-1
BUI-1
VRS-2
APS-1
SOL-3
SOL-2
SOL-1
DIV-1
SWD-1
BEI-1
RUI-2
RUI-1
NNE-2
EMO-1
NAG-1
ZEW-1
LEL-1
HES-1
RAL-1
WSP-1
WRV-1
ARV-1
APN-1
HZW-1
ALP-1
BNV-1
PNA-11
ZOM-11
ODK-1
GAG
DEL-2
EVD-1
HVS-1
MOL-1
OVE-1
STR-1
STB-1
WDR-17
KNOKKE
KALLO
A
B

RIJKS GEOLOGISCHE DIENST HAARLEM

PROJEKT: ONDERGRONDSE OPSLAG EN WINNING VAN WARM WATER

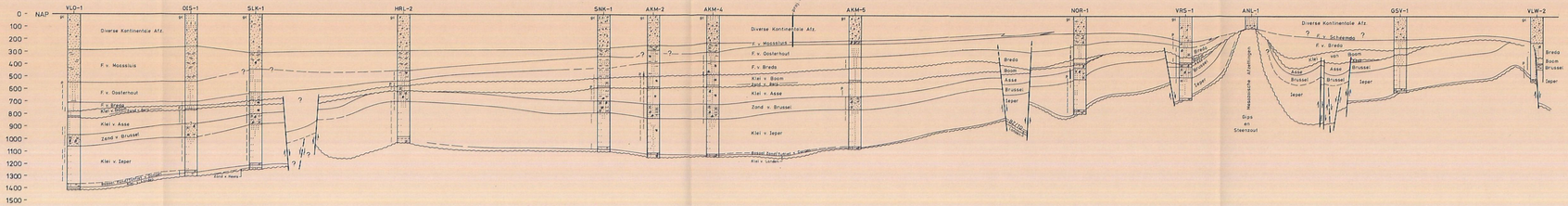
PROFIEL: A-A' B-B'

BIJLAGE 15	HORIZONTALE SCHAAL 1: 250.000
DATUM: FEBRUARI 1985	VERTIKALE SCHAAL 1:20 000

SAMENST. J.Breeuwer, Th. Doorn, C. Leyzers Vis, N. Parker

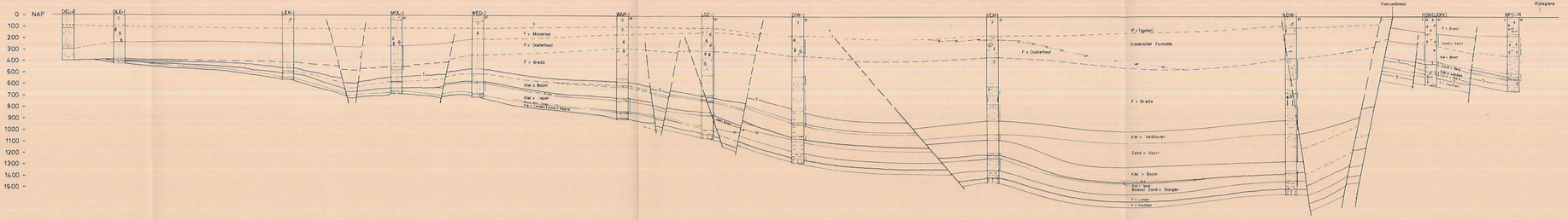
PROJEKT Nº PBE 9074 0.050, RGD 10371, DGV 4520 | TEK.: Ev.d E. J.H.

C

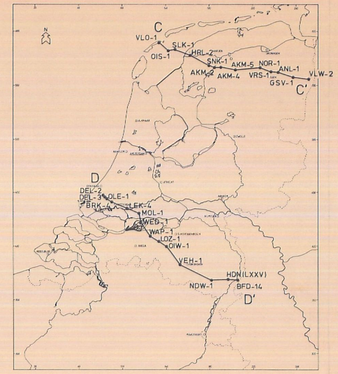


C'

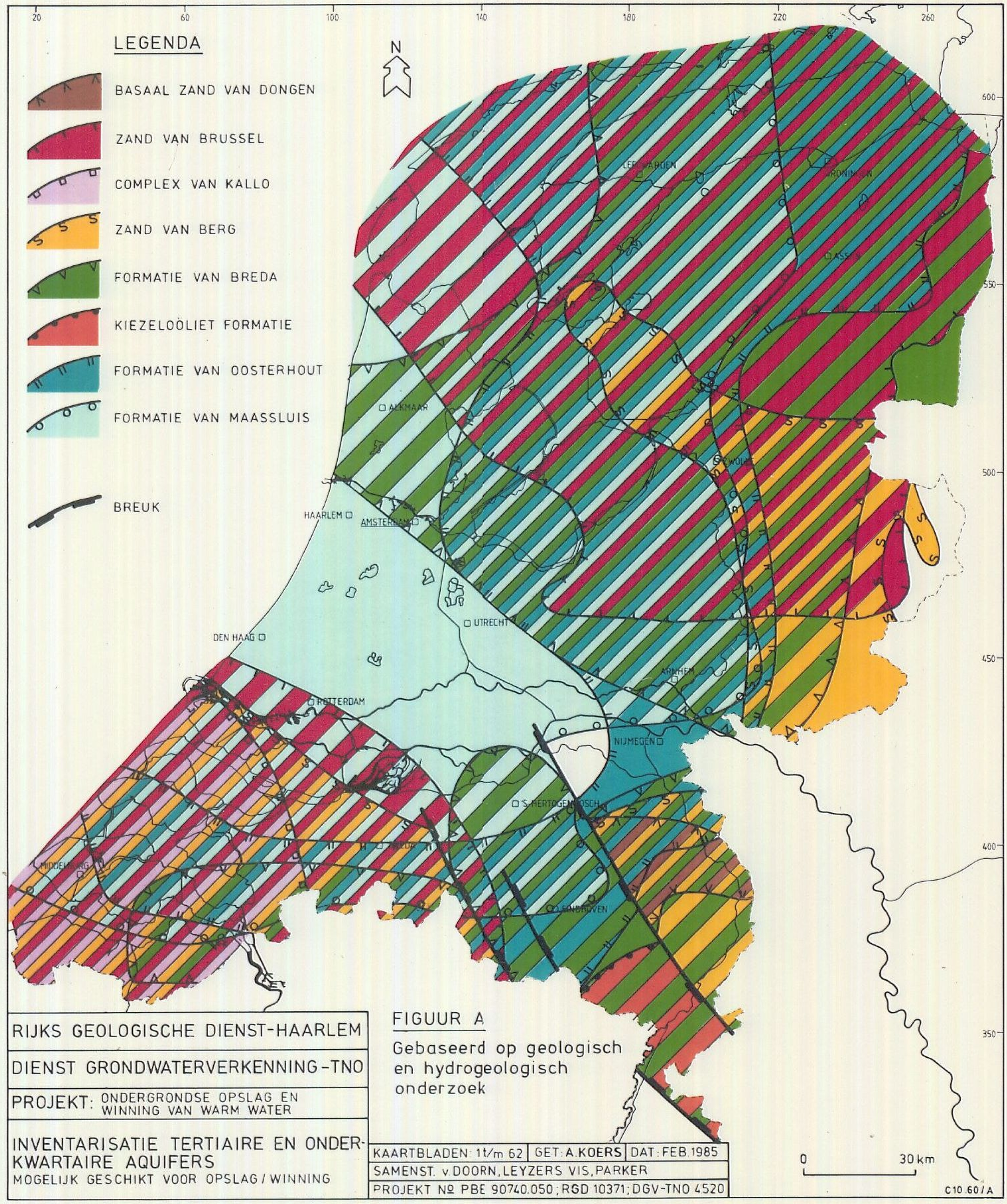
D



D'



RIJKS GEOLOGISCHE DIENST HAARLEM	
PROJEKT: ONDERGRONDSE OPSLAG EN WINNING VAN WARM WATER	
PROFIEL: C-C' D-D'	
BIJLAGE: 16	HORIZONTALE SCHAAL 1:250.000
DATUM: FEBRUARI 1985	VERTIKALE SCHAAL 1:20.000
SAMENST. J. Breeuwer, Th.v. Doorn, C. Leyzers Vis, N. Parker	
PROJEKT Nº PBE 90740.050, RGD 10371, DGV 4520	TEK.: E.v.d.E., J.H.



LEGENDA

- BASAAL ZAND VAN DONGEN
- ZAND VAN BRUSSEL
- COMPLEX VAN KALLO
- ZAND VAN BERG
- FORMATIE VAN BREDA
- KIEZELOÖLIET FORMATIE
- FORMATIE VAN OOSTERHOUT
- FORMATIE VAN MAASSLUIS
- BREUK

RIJKS GEOLOGISCHE DIENST-HAARLEM

DIENST GRONDWATERVERKENNING-TNO

PROJEKT: ONDERGRONDSE OPSLAG EN WINNING VAN WARM WATER

INVENTARISATIE TERTIAIRE EN ONDER-KWARTAIRE AQUIFERS
MOGELIJK GESCHIKT VOOR OPSLAG / WINNING

FIGUUR A

Gebaseerd op geologisch en hydrogeologisch onderzoek

KAARTBLADEN: 1t/m 62	GET: A.KOERS	DAT: FEB.1985
SAMENST. v.DOORN, LEYZERS VIS, PARKER		
PROJEKT Nº PBE 90740.050; RGD 10371; DGV-TNO 4520		