

HET ONDIEP ONDERGRONDSE TEMPERATUURVELD

IN NEDERLAND

(volgens temperatuurmetingen tot 1984)

Auteur : drs. W. van Dalftsen

Opdrachtgever : Projectbureau Energieonderzoek van
TNO

Rapport nr. : OS 83-31

Datum : december 1983

DIENST GRONDWATERVERKENNING TNO
DELFT - Oosterwolde (Fr.)

De uitvoering van dit project is ondersteund door het
Projectbureau Energieonderzoek van TNO in het kader van
het Nationaal Onderzoekprogramma Aardwarmte (projectnr.
90740.010).

	blz.
<u>INHOUD</u>	
SUMMARY	II
SAMENVATTING	III
1. INLEIDING	1
2. DE METINGEN	3
2.1. Aantallen en geografische verdeling	3
2.2. Uitvoering	3
2.3. Meetuitrusting	4
2.4. Betrouwbaarheid van de temperatuur- en dieptewaarden	6
3. ISOTHERMENKAARTEN	7
3.1. Weergave van isothermen	7
3.2. Het isothermenbeeld	8
4. GEODYNAMISCHE PROCESSEN EN ONDERGRONDSE WARMTEHUISHOUDING	10
5. VERWIJZINGEN	13

SUMMARY

The shallow subsurface temperature field of The Netherlands has been explored systematically since 1976. Temperature data are obtained by accurately logging of temperature profiles, mostly down into deep groundwater observation wells. Based on all observations until 1984, isotherm maps have been assembled for 10 depths below ground surface, increasing from 25 m to 250 m in steps of 25 m. Temperatures are relatively low in areas where groundwater is recharged by precipitation, notably the Veluwe and Utrechtse Heuvelrug areas and parts of the Drents Plateau area. Temperatures are relatively high in areas where groundwater exfiltrates from deep groundwater flow systems, or where the Earth's heat flow concentrates itself into salt domes. Relatively high temperatures occur in the area north of Venlo; their cause cannot be assessed clearly yet. The intimate relationship between the large scale heat transfer in the Earth's crust and mantle and geodynamic process, which took place in the past, possibly constitutes a key for interpretation.

SAMENVATTING

Sinds 1976 vindt een systematische verkenning plaats van het ondiep ondergrondse temperatuurveld in Nederland. Temperatuurgegevens worden verkregen door nauwkeurige opname van temperatuurprofielen in overwegend diepe grondwater-waarnemingsputten. De waarnemingen tot 1984 zijn verwerkt tot isothermenkaarten voor 10 diepten onder maaiveld, oplopend van 25 m tot 250 m in stappen van 25 m. Temperaturen zijn betrekkelijk laag onder gebieden met grondwateraanvulling uit neerslag zoals de Veluwe, Utrechtse Heuvelrug en delen van het Drentse Plateau. Temperaturen zijn betrekkelijk hoog in gebieden waar grondwater exfiltreert uit een diepreikend grondwaterstromingsstelsel, of warmtestroom uit de aarde zich verdicht in zoutkoepels. Onder het gebied ten noorden van Venlo heersen relatief hoge temperaturen, waarvan de oorzaak niet onomstotelijk is aan te geven. Het innige verband tussen grootschalige warmte-overdracht in aardkorst en aardmantel en geodynamische processen, die zich in het verleden afgespeeld hebben, biedt mogelijk een sleutel voor interpretatie.

1. INLEIDING

Eind 1976 begon de Dienst Grondwaterverkenning (DGV) van TNO met systematische verkenning van het ondiep ondergronds temperatuurveld in Nederland. Deze verkenning maakte aanvankelijk deel uit van het eerste programma van de Europese Gemeenschap (EG) (1975-1979) voor onderzoek en ontwikkeling van (geothermische) energie. Doel van het onderzoek was het aardwarmte-potentieel binnen het gebied van de Gemeenschap in kaart te brengen.

Tot 1980 werden op 251 lokaties ondergrondse temperaturen gemeten. Op enkele uitzonderingen na vonden deze metingen plaats in stijgbuizen van diepe waarnemingsputten (peilputten), ingericht voor grondwateronderzoek op regionale schaal en in waterwingebieden. In enkele gevallen werden temperaturen opgenomen in putten voor winning van grondwater of steenzout. Deze putten waren geruimte tijd buiten bedrijf geweest voordat de temperatuuroptnamen hierin plaatsvonden. De temperatuurmetingen werden verwerkt tot isothermenkaarten (schaal 1:600 000) voor 10 diepten onder maaiveld: van 25 m tot 250 m met een vast diepte-interval van 25 m. In verkleinde vorm zijn deze kaarten met toelichting uitgebracht aan de EG, en aan het Projectbureau Energieonderzoek (PBE) van TNO (Van Dalftsen, 1981). Dit bureau had intussen de leiding gekregen van het eerste Nationaal Onderzoekprogramma Aardwarmte (NOA I).

Sinds 1980 is de verkenning van het ondiep ondergrondse temperatuurveld voortgezet in het kader van NOA I. Hiervoor zijn in het tijdvak 1980-1982 door DGV temperaturen gemeten in 92 waarnemingsputten. Hieronder bevinden zich nagenoeg alle diepe waarnemingsputten van de laatste jaren, daarnaast ook oudere en minder diepe putten in gebieden, waarvoor verbetering in de bestaande isothermenkaarten wenselijk werd geacht. In dit rapport worden bijgestelde isothermenkaarten uitgebracht, die de in 1981 verschenen kaarten vervangen. De bijstelling is niet alleen uitgevoerd op grond van bovengenoemde temperatuurmetingen; er is ook gebruik gemaakt van overige temperatuurmetingen van DGV.

De overige temperatuurmetingen zijn door DGV uitgevoerd ten behoeve van andere projecten dan landelijke verkenning van het ondiep

ondergrondse temperatuurveld. Deze projecten hadden verschillende doelen: (1) thermische bepaling van ondergrondse verbreding van percolaat uit vuilstorten of van kunstmatig aangevuld grondwater, (2) bepaling van de herkomst van hinderlijk zout grondwater in een waterwingebied, (3) regionale grondwaterverkenning en (4) bepaling van temperaturen bij ondergrondse warmtewisselaars vóór en tijdens bedrijf.

Het eerder genoemde rapport (The shallow subsurface temperature field in The Netherlands) is niet overbodig geworden, nu de isothermenkaarten daarin zijn verbeterd door inbreng van nieuwe gegevens. Veel achtergrondinformatie en beschouwingen in dat rapport blijven geldig. Hiernaar wordt in dit rapport verwezen met de aanduiding temperatuurveld 1981.

2. DE METINGEN

2.1. Aantallen en geografische verdeling

In het tijdvak 1980-1982 zijn op 92 lokaties in Nederland (tabel 1) temperaturen gemeten ten behoeve van de voortgezette verkenning van het ondiep ondergrondse temperatuurveld. Deze metingen vonden grotendeels plaats in diepe waarnemingsputten, die sinds 1979 gereed gekomen zijn. Hun ligging is niet gelijkmatig over Nederland verdeeld, maar hoofdzakelijk geconcentreerd in de volgende gebieden: het grensgebied van Brabant met België, het zuidelijk deel van Limburg, het midden en zuiden van Friesland en het oosten van Groningen met aangrenzend gebied van Drenthe. Verder is een aanzienlijk aantal temperatuuroptnamen gemaakt in niet-recente, ondiepe waarnemingsputten in de Over-Betuwe. Door de afwezigheid van bruikbare, diepe waarnemingsputten zijn echter (opnieuw) geen diepe temperatuurgegevens verkregen uit Zeeland, Zuid-Holland, het noorden van Friesland en Groningen (inclusief de Waddeneilanden), Twente, de Achterhoek, het noordoosten van Brabant en het noorden van Limburg.

Het aantal lokaties met overige temperatuurmetingen (uitgevoerd buiten opdracht van PBE) bedraagt circa 100. De diepte van deze opnamen reikt meestal niet verder dan 100 m. De lokaties hiervan zijn, tezamen met de meetlokaties van de vroegere temperatuuroptnamen (temperatuurveld 1981, paragraaf 2.1) en die volgens tabel 1, aangegeven op de isothermenkaarten van dit rapport (figuren 1-10). Veel lokaties liggen zeer dicht opeen in groepjes, bijvoorbeeld op de Veluwe en Utrechtse Heuvelrug. Meer verspreid zijn veel overige temperatuurprofielen opgenomen in de zuidelijke helft van Friesland.

2.2. Uitvoering

Uitvoering van de temperatuurmetingen verliep volgens dezelfde methode als bij de eerdere metingen (temperatuurveld 1981, paragraaf 2.3). Ten opzichte van het vorige onderzoek echter zijn nu bij opname van temperatuurprofielen in diepe waarnemingsputten vaker diepte-intervallen gekozen van 2 m tussen opeenvolgende temperatuuraflezingen. Deze meetmethode doet nauwelijks af aan de bruikbaarheid van de metingen voor landelijke verkenning van het ondiep ondergrondse temperatuurveld.

Tabel 1. Lijst van putten met NOA-temperatuurmetingen in het tijdvak 1980-1982

serie- nr.	plaats	kaartblad- boorgatnr. (RID/RGD)	Nieuw-Amersfoort- coördinaten		maximum diepte van temperatuur- meting (m)	meetdatum
			X	Y		
1	Ospel	58A-96	186,3	368,9	229	080780
2	Spannenburg	15F-121	176,8	546,4	239	170780
3	Witmarsum	10B-191	159,3	567,2	437	180780
4	Renkum	39F-320	178,2	443,6	64	250880
5	Heteren	39F-315	178,6	442,0	66	250880
6	Eimeren	40C-414	184,7	435,5	79	250880
7	Elst	40C-406	184,5	437,1	70	260880
8	Driel	40A-397	186,4	440,9	114	260880
9	Hazeldonk	50B-209	110,1	390,0	178	090980
10	Wernhout	50C-79	103,2	384,7	163	090980
11	Breda	50A-238	109,2	394,1	30	090980
12	Castelré	50D-13	113,5	380,7	175	090980
13	Groot Bedaf	50G-47	128,4	384,7	200	100980
14	Baarle-Nassau	50G-44	122,3	379,6	204	100980
15	Brakel	50E-201	129,3	390,7	39	100980
16	Stuivesant	50A-232	106,2	388,8	206	110980
17	Goirle	50H-12	133,6	387,0	127	110980
18	Rucphen	49F-325	96,8	393,9	109	120980
19	Papenvoort	12G-75	242,4	553,7	182	150980
20	Anloo	12G-78	248,5	561,1	252	160980
21	Spannenburg	15F-122	174,5	548,6	291	180980
22	Vegelinsoord	11C-96	184,8	559,2	247	180980
23	Eernewoude	11B-69	193,3	571,7	177	190980
24	Bant	15H-31	179,4	535,3	248	200980
25	Kampen	21C-113	185,8	511,9	218	200980
26	Valburg	39F-327	179,3	438,7	48	201080
27	Heteren	39F-314	179,7	440,5	66	201080
28	Fikkersdries	40A-406	185,0	440,5	70	201080
29	Elst	40C-430	187,5	436,9	36	201080
30	Valburg	40A-422	181,9	438,5	55	201080
31	Renkum	39F-321	178,6	444,6	87	201080
32	Zandvoort	24H-475	97,0	484,4	166	210181
33	Zandvoort	24H-473	97,0	484,4	178	210181

Vervolg van Tabel 1.

serie-nr.	plaats	kaartblad-boorgatnr. (RID/RGD)	Nieuw-Amersfoort-coördinaten		maximum diepte van temperatuurmeting (m)	meetdatum
			X	Y		
34	Zandvoort	24H-476	97,0	484,4	166	050281
35	Akkrum	11C-95	184,4	560,7	229	040481
36	Oudega (W)	10G-16	166,7	556,0	137	040481
37	Nijbeets	11B-71	197,7	564,0	226	040481
38	Twello	33E-180	202,6	474,2	185	250881
39	Wenum	33B-270	194,6	474,5	245	260881
40	Eerbeek	33G-222	202,9	458,7	202	260881
41	Eerbeek	33D-131	199,9	457,2	176	270881
42	Tirns Syltjestate	10F-54	170,1	563,0	289	310381
43	Marum	6H-64	216,2	578,2	124	140981
44	Marum	6H-65	213,6	575,5	15	140981
45	Zuidlaren	12E-240	245,8	569,3	166	150981
46	Zuidlaren	12E-237	245,3	569,2	171	150981
47	Zuidlaren	12E-238	245,6	570,1	172	150981
48	Zuidlaren	12E-239	245,0	569,9	150	150981
49	Glimmen	12B-124	237,5	572,4	140	160981
50	Veendam	12F-129	254,8	568,8	22	170981
51	Marum	11F-62	213,5	574,3	44	170981
52	Winschoten	13A-248	263,1	574,8	148	170981
53	Winschoten	13A-251	261,2	571,1	179	170981
54	Arnhem	40B-246	193,2	448,7	51	210981
55	Arnhem	40B-303	191,5	440,5	130	210981
56	Arnhem	40B-305	190,3	439,6	154	210981
57	Arnhem	40B-349	191,7	440,4	107	210981
58	Schayk	45F-174	173,0	416,7	23	210981
59	Overlangel	45F-175	176,7	420,5	99	210981
60	Zeeland	45H-75	178,3	410,0	20	210981
61	Zoelen	39D-151	154,4	436,2	15	210981
62	Zoelen	39D-205	153,7	436,5	31	220981
63	Zoelen	39D-207	153,8	435,8	77	220981
64	Zoelen	39D-209	155,9	435,7	149	220981
65	Zoelen	39B-312	154,1	438,6	163	220981
66	Waverveen	31E-176	123,0	472,0	278	120582
67	Budel	57E-81	167,8	363,6	271	090682

Vervolg van Tabel 1.

serie- nr.	plaats	kaartblad- boorgatnr. (RID/RGD)	Nieuw-Amersfoort- coördinaten		maximum diepte van temperatuur- meting (m)	meetdatum
			X	Y		
68	Bergeijk	57B-69	155,9	364,5	82	090682
69	Luyksgestel	57A-43	144,9	363,8	360	100682
70	Beleven	56F-6	137,0	374,4	308	100682
71	Bergijk	57A-42	145,9	368,6	52	100682
72	Broekhuizen	52E-114	208,1	391,6	473	240682
73	Nieuweschans	8D-34	276,3	578,4	476	010782
74	Breezand	10C-157	143,2	559,3	400	020782
75	Jabeek	60D-1027	195,1	332,7	263	200982
76	Koningsbosch	60B-106	194,6	339,6	168	200982
77	Posterholt	60B-105	199,0	349,8	100	210982
78	Annendaal	60B-107	198,8	346,4	302	210982
79	Roosteren	60A-325	184,5	343,0	94	210982
80	Abdissenbosch	60G-123	201,0	326,0	170	210982
81	Maastricht	61F-396	175,6	318,5	250	220982
82	Neeritter	58C-172	182,9	352,6	232	220982
83	Weert	57H-74	170,7	358,5	275	220982
84	Schinnen	60C-839	189,0	327,8	186	230982
85	Hoensbroek	62B-837	192,3	324,7	46	230982
86	Hilvarenbeek	50F-157	138,4	389,0	280	051092
87	Wolfsven	57E-80	160,9	367,4	150	131082
88	Wintelre	51D-195	152,5	383,2	240	131082
89	Boerdonk	51F-155	170,4	396,8	214	131082
90	Den Bosch	45A-196	147,1	412,8	196	141082
91	Den Bosch	45A-224	147,7	412,6	242	141082
92	Nistelrode	45G-108	165,5	411,3	52	141082

Evenals eerder kwam het ook bij dit onderzoek veelvuldig voor dat de temperatuursonde ergens in een stijgbuis ophield te zakken, of dat de sonde wel ongehinderd zakte maar daarna niet meer of alleen met grote krachtsinspanning opgetrokken kon worden. In deze gevallen werden gewoonlijk kortere temperatuurprofielen opgenomen dan verwacht mocht worden op grond van diepte van de waarnemingsput. In sommige gevallen raakten kabel en sonde beschadigd of gingen verloren.

De oorzaken van bovengenoemde ongemakken zijn niet kant en klaar aan te geven. Waar de sonde niet verder zakte in een buis, is deze vermoedelijk sterk gekronkeld of vernauwd. Deze ongemakken zijn vermoedelijk toe te schrijven aan keuze van te dunwandige stijgbuizen, of aan onzorgvuldige inbreng van stijgbuizen en afwerking van de waarnemingsput. In sommige gevallen zou een niet te sterk gekronkelde stijgbuis wel doorlopen kunnen worden door een aangepaste, korte of buigzame temperatuursonde.

De weerstand tegen optrekken van kabel en sonde in sommige waarnemingsputten is een niet duidelijk opgehelderd verschijnsel. De verklaring hiervan is te zoeken in kleef van kabel tegen de stijgbuiswand, wanneer de temperatuursonde opgetrokken wordt. Stoffen die op de stijgbuiswand zijn neergeslagen en kronkels in de stijgbuis kunnen hierbij een min of meer belangrijke rol spelen.

Van 5 peilputten in Limburg (72, 77, 78, 79 en 81 volgens tabel 1) was bekend dat ze artesisch zijn met een stijghoogte ver boven maaiveld. De te doorlopen stijgbuis van deze peilputten werd met inschakeling van een hoogwerker verlengd tot boven de vrije stijghoogte, waarna de temperatuurmetingen op hoog niveau werden uitgevoerd. De hoogste stijghoogte hierbij trad op in waarnemingsput Broekhuizen (nr. 72), ten noorden van de gelijknamige plaats aan de westelijke Maasoever. De stijghoogte hier bedroeg ruim 11 m boven maaiveld.

2.3. Meetuitrusting

De meetuitrusting, waarmee de temperatuurgegevens in het tijdvak 1980-1983 verkregen werden, was van uiteenlopende makelij. Een deel van de metingen is uitgevoerd met DGV-instrumenten zoals eerder

beschreven (temperatuurveld 1981, paragraaf 2.2). De achtereenvolgens gebruikte exemplaren (sonde met toebehoren) hadden de nummers 7, 8 en 9.

Nadeel van bovengenoemde instrumenten was het sleepcontact op de kabelhaspel, waarover het meetsignaal naar een vrijstaande meetversterker geleid werd. Om dit sleepcontact te vermijden was de sectie Instrumentatie van DGV in 1981 begonnen met de ontwikkeling van een instrument met meetversterker in de kabelhaspel. Nadat dit instrument in het begin van 1982 gereed gekomen was, verving het van toen af de voorgaande instrumenten bij de verkenning van het ondiep ondergrondse temperatuurveld. Van het nieuwe type instrument zijn twee exemplaren gebruikt (nummers 10 en 11); zij geven temperatuurmeetwaarden aan tot op $1/1000$ °C. De grootste kabellengte bij dit instrument bedroeg circa 485 m. Deze lengte was echter niet toereikend om de temperatuurmetingen voort te kunnen zetten tot onderin de putten Broekhuizen en Nieuweschans (nrs. 72 en 73 in tabel 1).

Een deel van de overige temperatuurmetingen is uitgevoerd met instrumenten van het merk SEBA. Deze instrumenten onderscheiden zich van die van DGV-makelij in hun transducer (geen platina-weerstand) en door hun kortere kabel. Er zijn twee SEBA-sondes gebruikt, één met 50 m en één met 150 m kabel.

De temperatuurwaarden, die met de gebruikte instrumenten werden afgelezen, verschilden in het algemeen systematisch van de werkelijke waarden. De systematische afwijkingen zijn per sonde bepaald door calibratie. De calibratieprocedure verliep zoals eerder beschreven is (temperatuurveld 1981, paragraaf 2.4). De calibratie-resultaten zijn weergegeven in tabel 2.

Tabel 2. Correcties op afgelezen temperatuurwaarden

sonde-aanduiding	toe te passen correctie (K) op afgelezen temperatuurwaarden
DGV- 7	-0,12
DGV- 8	-0,17
DGV- 9	-0,17
DGV-10	-0,170
DGV-11	-0,170
SEBA- 50 m	-0,01
SEBA-150 m	+0,15

2.4. Betrouwbaarheid van de temperatuur- en dieptewaarden

Ondanks nauwkeurige temperatuuraflezingen (tot op 1/100 of 1/1000 °C), correctie daarop en nauwkeurige opmeting van afgewikkelde kabellengte, kunnen nog onberekenbare fouten sluipen in op te geven temperatuur- en dieptewaarden. Deze fouten kunnen voortkomen uit onopgemerkt verloop in de karakteristieken van elektronische componenten, kabelbeschadiging, scheefstand van een boorgat en kronkeling in stijgbuizen. Daarnaast is te wijzen op eerder genoemde foutenbronnen (temperatuurveld 1981, paragraaf 2.4). Al deze factoren tezamen maken dat er geen volkomen betrouwbare temperaturen in verband tot diepte opgegeven kunnen worden. Omdat de onbetrouwbaarheid van de temperatuurmetingen in het algemeen niet hoger is te schatten dan 0,1 °C, werden temperaturen afgerond tot op 0,1 °C vóór verwerking in dit rapport.

3. ISOTHERMENKAARTEN

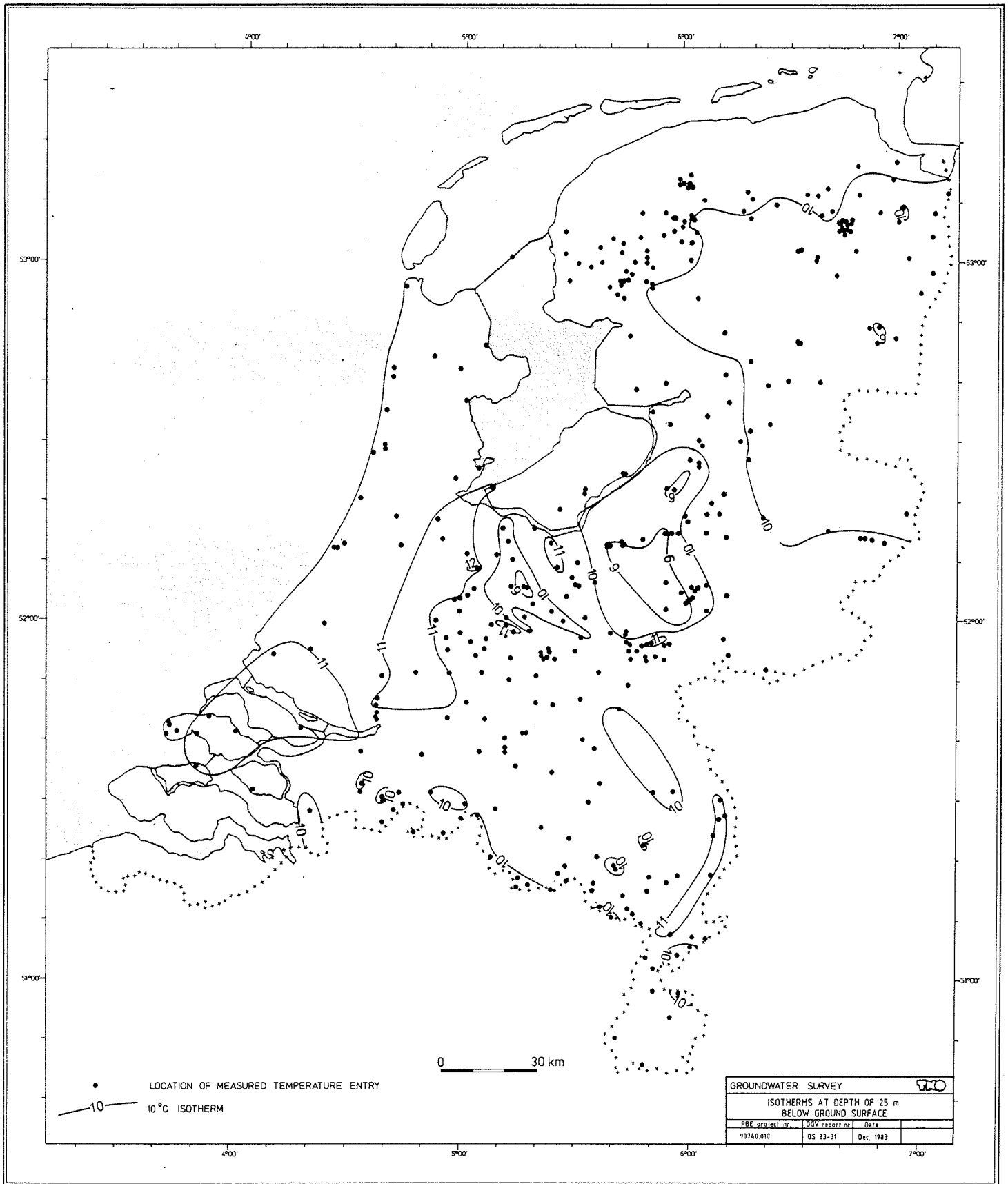
3.1. Weergave van isothermen

Het ondiep ondergrondse temperatuurveld in Nederland is weergegeven in 10 isothermenkaarten (figuren 1-10). Deze kaarten zijn opgesteld op grond van gegevens en inzichten, verkregen tot aanvang 1984. De kaarten gelden voor diepten van 25 m tot 250 m onder maaiveld, stapsgewijs oplopend met een interval van 25 m. De keuze van diepten opzichte van maaiveld is logisch, omdat dit oppervlakte uit het oogpunt van aardse warmtehuishouding overal eenzelfde karakteristieke rol vervult. De temperatuurprofielen die dieper reiken dan 250 m zijn weergegeven in de bijlage 1-15.

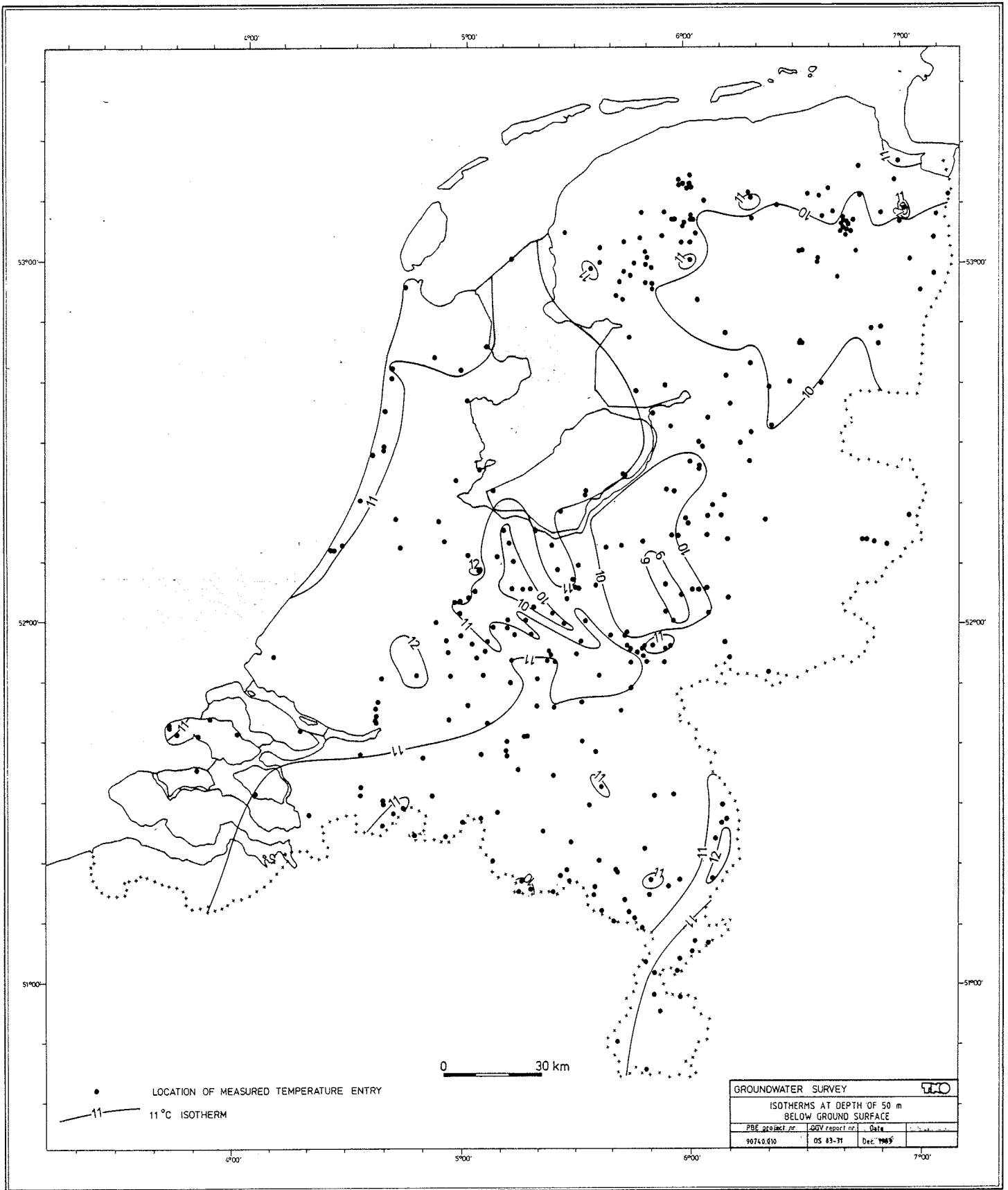
Evenals voorheen (temperatuurveld 1981, paragraaf 3.1) zijn de isothermen getrokken om de graad celsius. De punten op de isothermenkaarten geven de meetlokaties aan, waar een temperatuurwaarde voor de betreffende diepte bekend is. In sommige gebieden liggen de meetlokaties zo dicht opeen, dat deze op de gebruikte schaal niet afzonderlijk kunnen worden weergegeven. In een aantal van deze gebieden is het isothermenbeeld vereffend, omdat het hier niet mogelijk was verschillende, dicht opeen verlopende isothermen afzonderlijk te trekken. Deze vereffeningen houden uiteraard in dat de isothermenkaarten enkele kleine temperatuur-interval-vlakken minder weergeven, dan bekend zijn.

Evenals voorheen (temperatuurveld 1981) werden een aantal temperatuurprofielen geëxtrapoleerd tot diepere niveaus. Hierdoor komen op de isothermenkaarten voor deze niveaus vlakken voor, zonder directe referentie naar meetgegevens daarin.

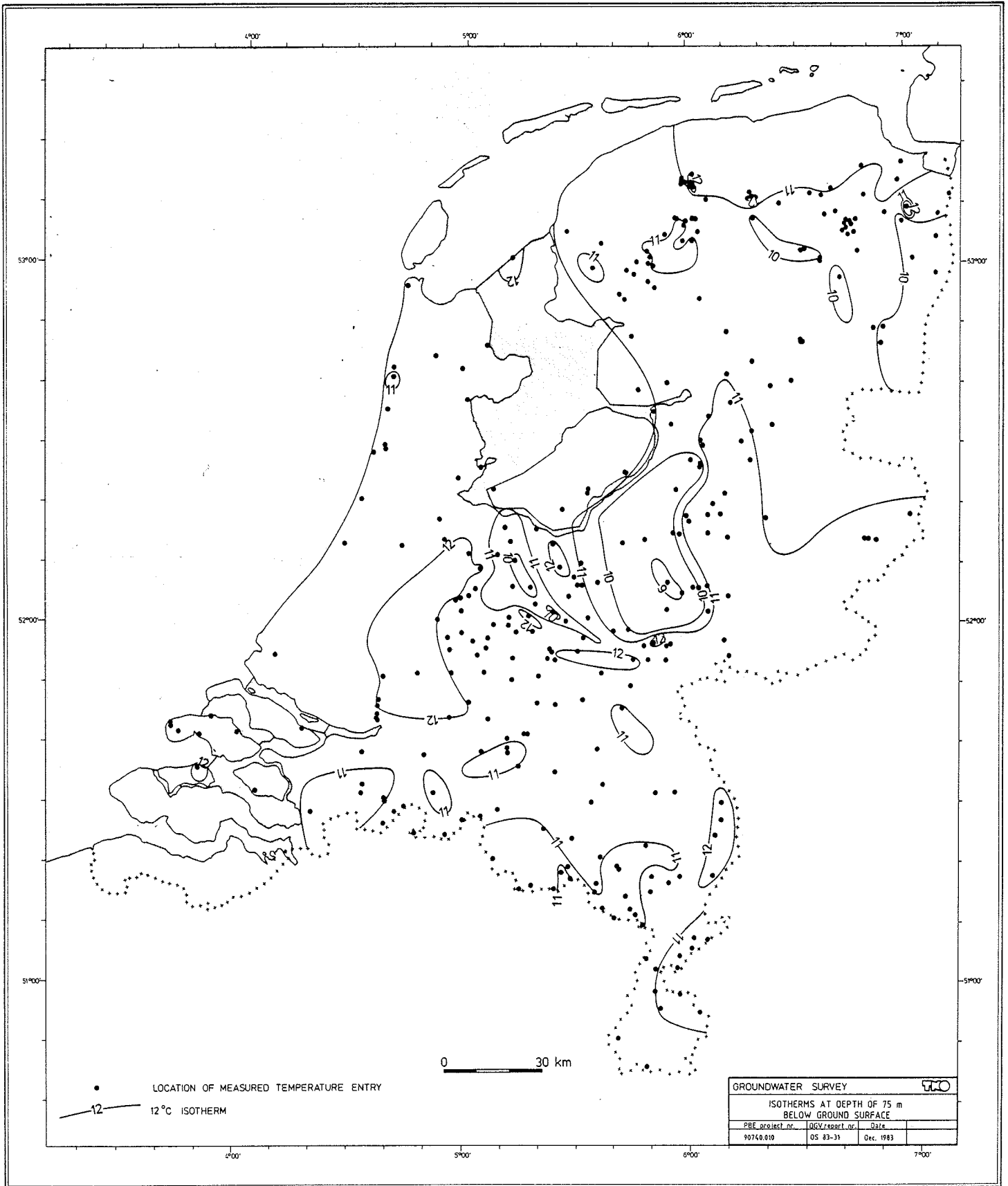
De aangegeven kaartvlakken op de isothermenkaarten zijn niet alle even betrouwbaar. Vanzelfsprekend is de betrouwbaarheid van een getrokken isotherm groter, naarmate de dichtheid van meetlokaties ter weerszijden daarvan groter is. Hierdoor is het isothermenbeeld in het midden van Nederland het meest betrouwbaar te achten. Minder betrouwbaar is het verloop van de isothermen in met name Zeeland, het noorden van Friesland en Groningen, Twente, de Achterhoek en het noorden en het zuidoosten van Limburg.



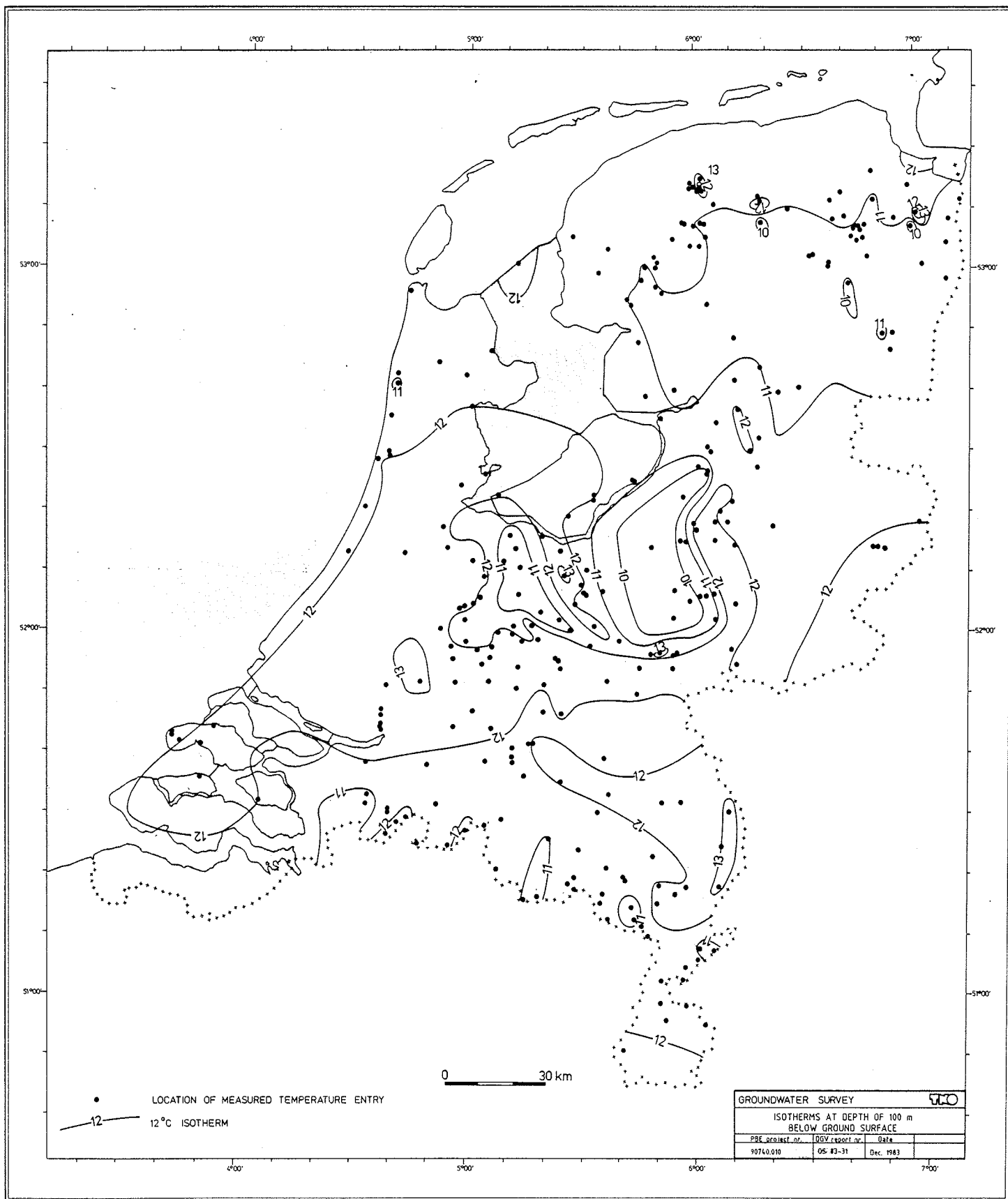
FIGUUR 1: ISOTHERMEN OP 25 m ONDER MAAIVELD



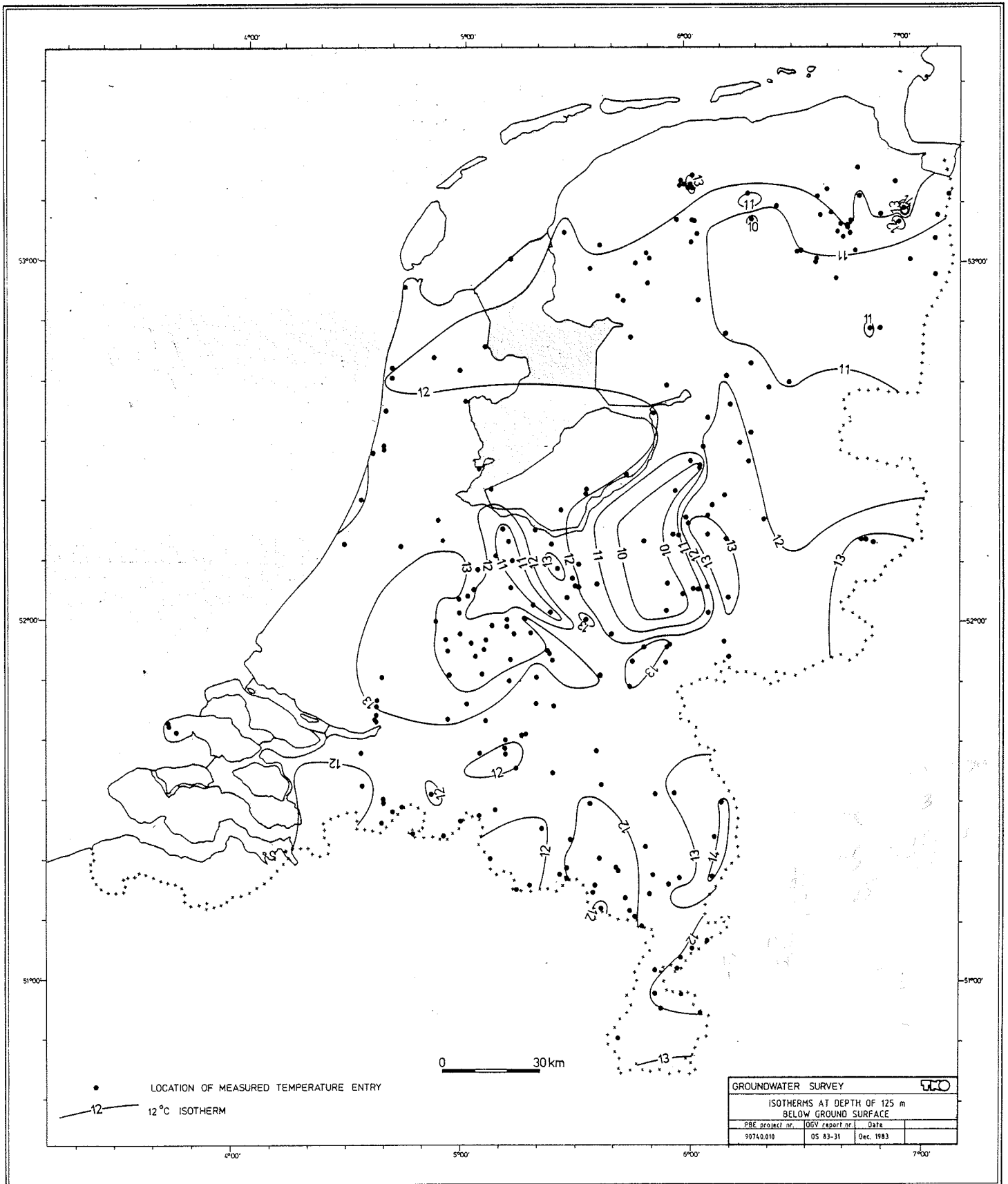
FIGUUR 2: ISOTHERMEN OP 50 m ONDER MAAVELD



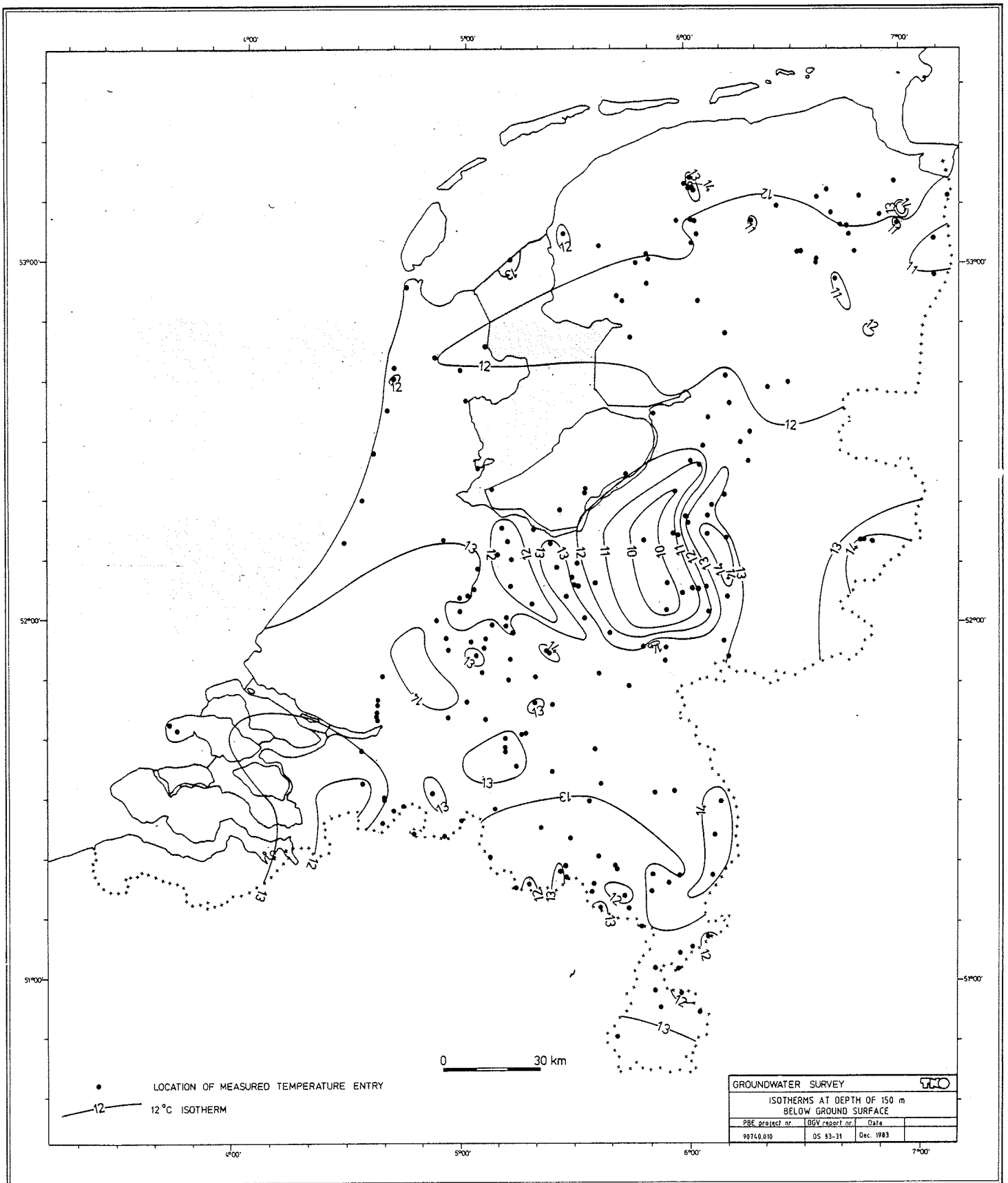
FIGUUR 3: ISOTHERMEN OP 75 m ONDER MAAIVELD



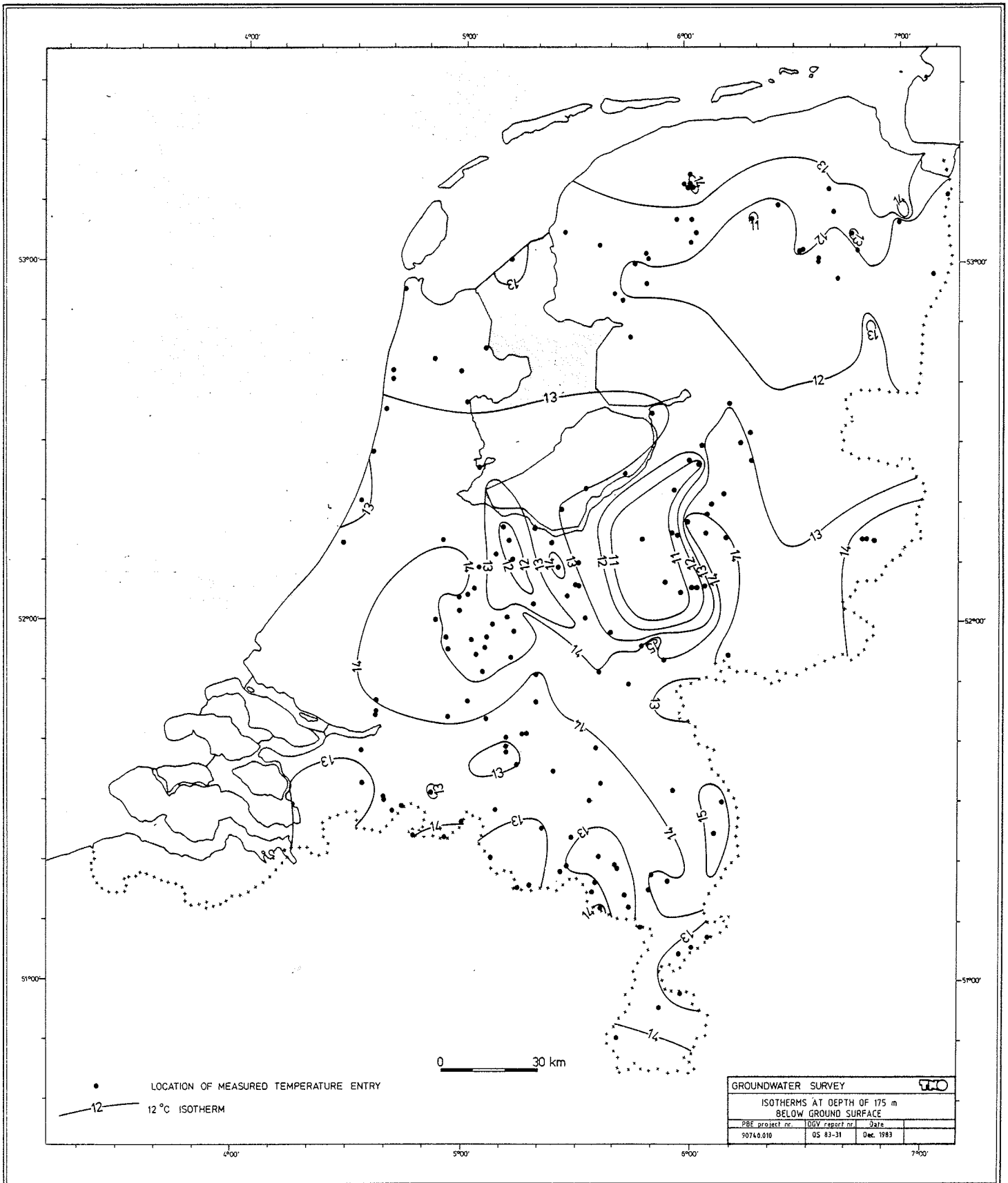
FIGUUR 4: ISOTHERMEN OP 100 m ONDER MAAIVELD



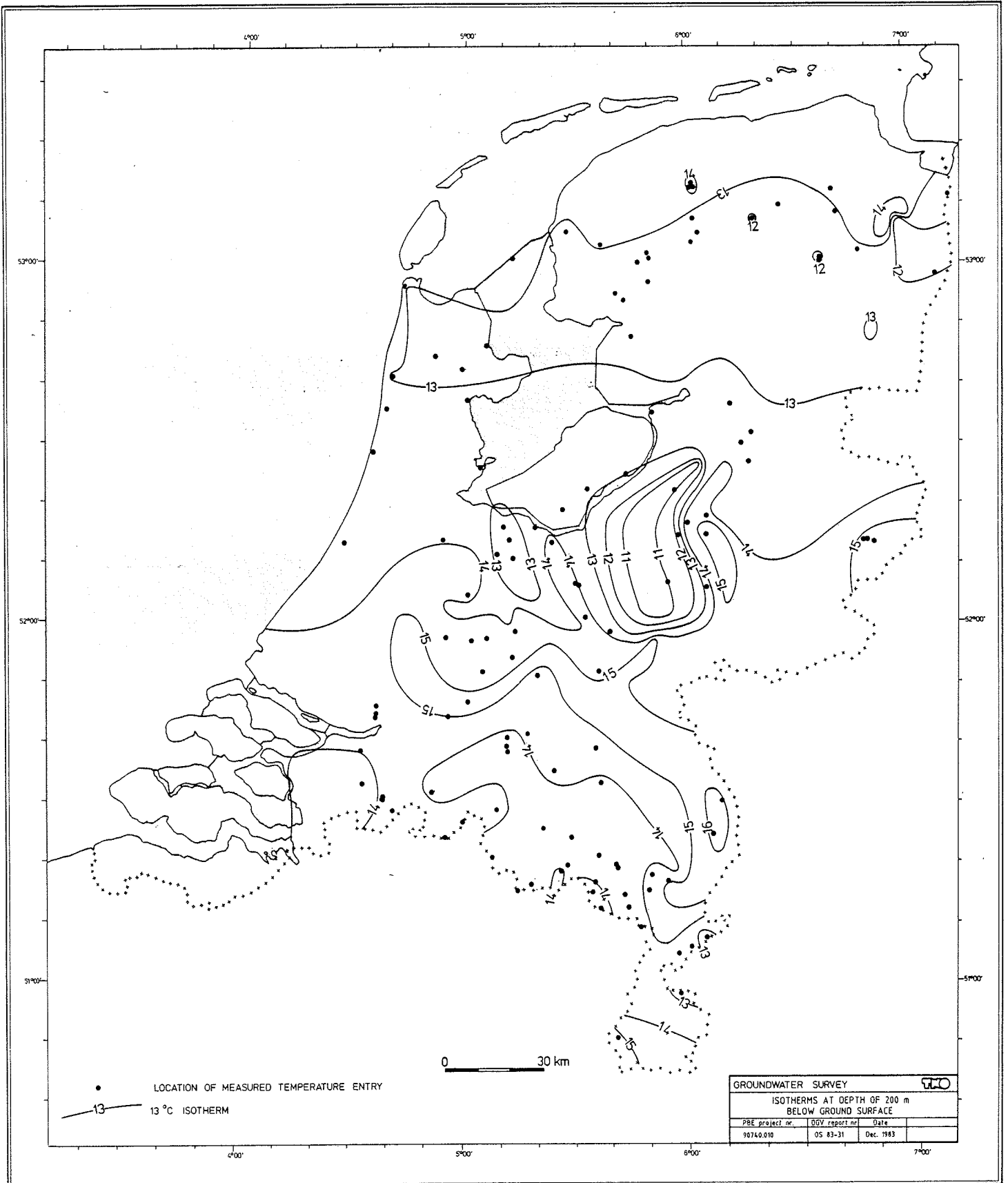
FIGUUR 5: ISOTHERMEN OP 125 m ONDER MAAIVELD



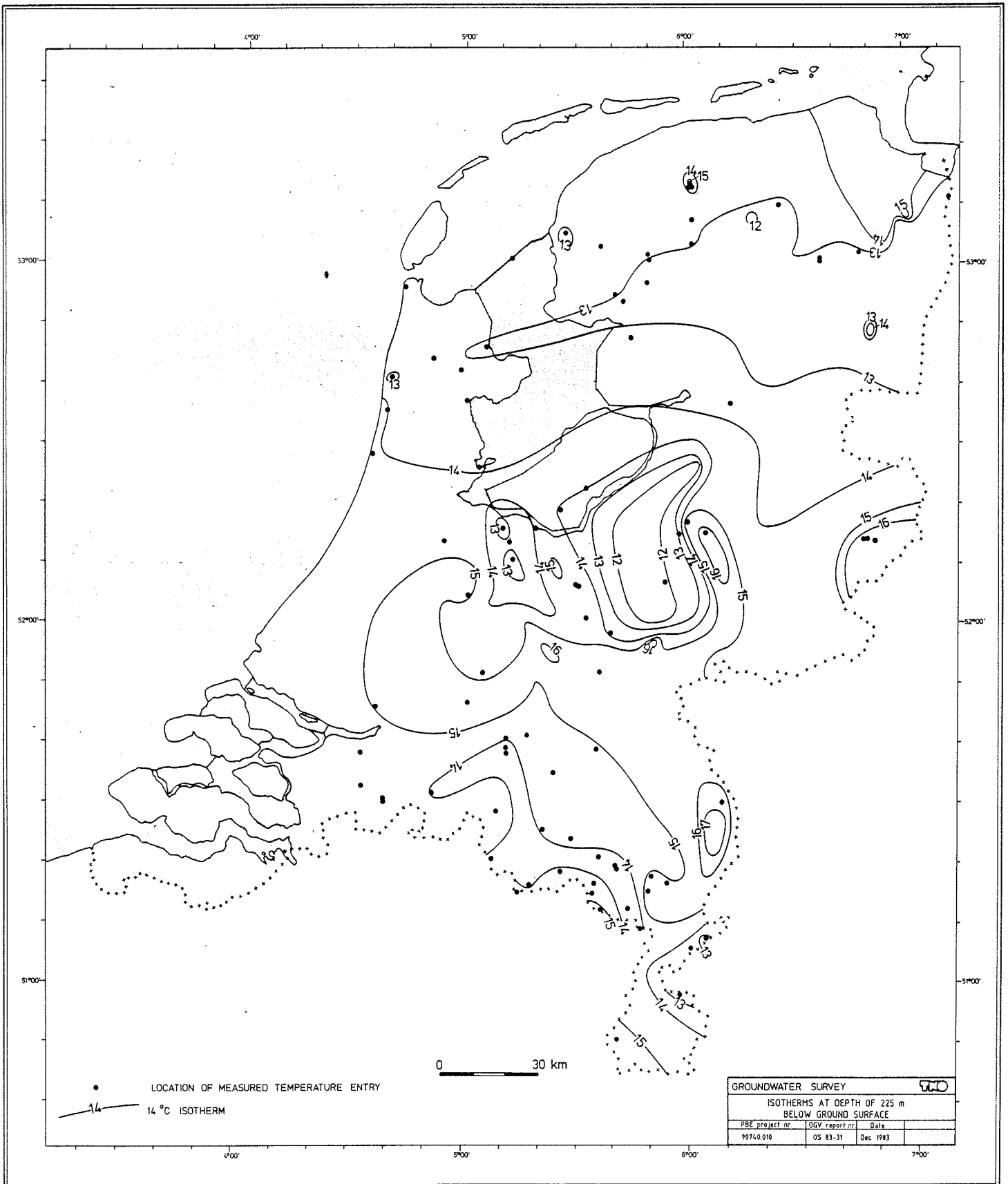
FIGUUR 6: ISOTHERMEN OP 150 m ONDER MAAIVELD



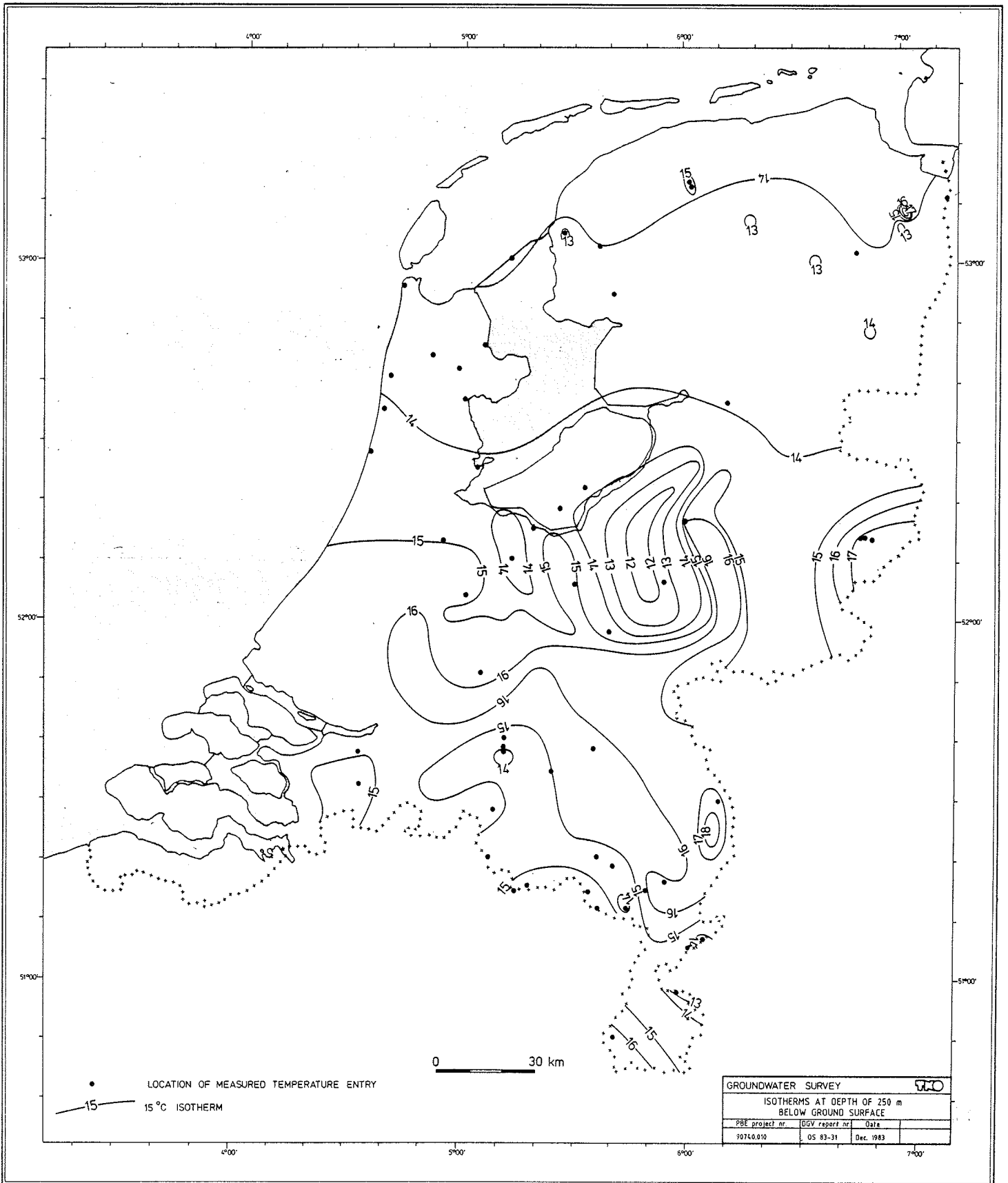
FIGUUR 7: ISOTHERMEN OP 175 m ONDER MAAIVELD



FIGUUR 8: ISOTHERMEN OP 200 m ONDER MAAIVELD



FIGUUR 9: ISOTHERMEN OP 225 m ONDER MAAIVELD



FIGUUR 10: ISOTHERMEN OP 250 m ONDER MAAIVELD

3.2. Het isothermenbeeld

Het isothermenbeeld in dit rapport van het ondiep ondergrondse temperatuurveld verschilt niet in belangrijke mate van het eerder uitgebrachte isothermenbeeld (temperatuurveld 1981, paragraaf 3.1). Aan de grote lijnen hiervan is door de temperatuurmetingen na 1979 weinig veranderd.

De meest ingrijpende bijstelling van het isothermenbeeld was noodzakelijk voor het grensgebied van Brabant met België. Hier werden in nieuwe waarnemingsputten te zuiden van Breda en ten noorden van Turnhout (België) temperaturen gemeten, die 1-2 °C hoger zijn dan afgeleid zou worden uit de vroegere isothermenkaarten.

Drie nieuwe meetlokaties, te weten bij Winschoten, ten oosten van Driel in de Over-Betuwe en bij Broekhuizen ten noorden van Venlo (respectievelijk nrs. 52, 8 en 72 volgens tabel 1), onderscheiden zich van de overige door relatief hoge temperaturen in de ondiepe ondergrond. De metingen op de laatste lokatie (Broekhuizen) bevestigen het eerder gevonden beeld van een gebied met relatief hoge ondergrondse temperaturen ten noorden van Venlo. Was eerder dit gebied al onderkend uit het temperatuurprofiel tot 200 m in de put Californië en het profiel tot 100 m in de put Homberg (temperatuurveld 1981, paragraaf 3.2), nu is gebleken dat relatief hoge temperaturen zich voortzetten tot minstens 473 m in de naburige put Broekhuizen. Op genoemde diepte bedraagt de temperatuur 26,8 °C bij een (verticale component van de) temperatuurgradiënt van 50 millikelvin per meter (bijlage 9); op 250 m bedraagt de temperatuur 17,7 °C.

Evenals voorheen (temperatuurveld 1981, hoofdstuk 4) is ook nu (nog) geen onomstotelijke verklaring te geven van de betrekkelijk hoge ondergrondse temperaturen in de putten ten noorden van Venlo en in de Betuwe. Wel is in het volgende hoofdstuk van dit rapport het wijdere kader geschetst van de aardse warmtehuishouding volgens inzichten die in de laatste decennia opgang gemaakt hebben.

De hoge temperatuur-anomalie bij Winschoten is eenvoudig te verklaren uit de aanwezigheid ter plaatse van een zoutkoepel (Van Montfrans,

1975). Door zijn betere warmtegeleiding, wordt daarin warmtestroom uit de aarde geconcentreerd (schoorsteen-effect) en heerst boven de zoutkoepel een hogere temperatuurgradiënt dan bij afwezigheid daarvan het geval zou zijn.

Naast plaatsen op de Veluwe, waar op 25 m diepte temperaturen heersen van minder dan 9°C , blijkt dit nu ook op de Utrechtse Heuvelrug het geval te zijn bij Soesterberg. Zoals eerder (temperatuurveld 1981, paragrafen 4.1 en 4.3) is uiteengezet, zijn de lage ondergrondse temperaturen in deze gebieden toe te schrijven aan advectief koudetransport met meteorisch water, dat hier infiltreert en in de ondergrond voortgaat in de hydrologische kringloop. De laagste meetwaarde op 250 m diepte bedraagt $12,3^{\circ}\text{C}$ in de put Hoenderloo op de Veluwe.

4. GEODYNAMISCHE PROCESSEN EN ONDERGRONDSE WARMTEHUISHOUDING

Het ondergrondse temperatuurveld wordt bepaald door produktie en transport van warmte in de aarde, en door uitwisseling van warmte tussen de vaste aarde en haar omgeving. Deze thermische processen spelen zich meer of minder herkenbaar af op wijd uiteenlopende schaal van ruimte in de aarde, en van (geologische) tijd. Goed bekend zijn de alom waarneembare verschijnselen dicht onder het aardoppervlak. Deze zijn (1) de natuurlijke dagelijkse en jaarlijkse berging en lozing van zonnewarmte in de bodem en ondiepe ondergrond en (2) geleiding van aardwarmte uit de diepte naar het aardoppervlak. Minder duidelijk, maar soms toch van belang bij de bepaling van warmtestroomdichtheden, is het door klimaatveranderingen bepaalde temperatuurverloop in de ondergrond. Verder is in de eerste fase van de ondiepe geothermische verkenning van Nederland (temperatuurveld, 1981) gebleken dat stroming van grondwater leidt tot temperatuurverdelingen waarin het bewegingspatroon van het grondwater zich weerspiegelt. In dit geval is sprake van advectief warmtetransport in grondwaterstromingsstelsels. Thermische effecten van grondwaterstroming in regionale grondwaterstromingsstelsels zijn intussen kwantitatief bepaald door Smith en Chapman (1983).

Minder goed bekend dan de boven geschetste warmtehuishouding ondiep in de aarde is die op grote diepte in de aardkorst en daaronder. Hier bevinden zich de belangrijkste warmtebronnen en spelen zich processen af die onlosmakelijk verbonden zijn met de grootschalige warmtehuishouding van de aarde. Voor het begrip hiervan zijn twee ontdekkingen belangrijk geweest, eerst de ontdekking van radioactiviteit en later die van de plaattektoniek.

Na de ontdekking van radioactiviteit kon een groot deel van de warmtestroom uit de aarde verklaard worden met verval van radioactieve atoomkernen in de aardkorst (Turcotte en Schubert, 1982). De meest voorkomende radioactieve isotopen zijn uranium 238, uranium 235, thorium 232 en kalium 40. De concentraties van deze isotopen in de verschillende gesteenten in de aardkorst zijn zo groot, dat de warmteproduktie van de vervallende kernen een groot deel van de

warmtestroom op de meeste plaatsen op aarde in stand houdt. Het overige deel van de warmtestroom is afkomstig van de inwendige hitte op grotere diepten in de aardkorst en in de mantel.

In het licht van de plaattektoniek is de aarde geen star maar een dynamisch lichaam. Hierin vinden grootschalige bewegingen plaats, waarvan bewegende platen aan het aardoppervlak uiting zijn. Deze platen worden aangemaakt met heet mantelmateriaal dat opstijgt onder een wereldomspannend systeem van ruggen. Aan de vorming van deze ruggen ging slenkvorming in een continent vooraf. Deze slenk- of bekkenvorming is toe te schrijven aan afkoeling, en bijgevolg inkrimping, van een eertijds opgewarmd deel van de aardkorst. Zichtbare tekenen van (vroegere) opwarming zijn vulkanen. Platen kunnen niet alleen aangroeien langs een slenkensysteem, zonder elders te plooiën of weer in de diepte te verdwijnen. Uitingen van het laatste zijn gebergten zoals de Alpen en de Himalaya en diep-zee-troggen.

Door de opstijging van het mantelmateriaal onder de spreidingszones van de platen is de warmtestroom uit de aarde hier hoog. De hoge warmtestroom is te danken aan heet mantelmateriaal kort onder het aardoppervlak. Onder deze geologische omstandigheden wordt op IJsland aardwarmte geëxploiteerd.

Van belang voor de geothermie is het voorkomen van continentale bekkens en slenken met ondiepe overgang van betrekkelijk koud en star gesteente (lithosfeer) naar gesteente met viskeuze eigenschappen (asthenosfeer). Bekende voorbeelden in Europa hiervan zijn het Pannonische bekken, dat voor een groot deel beslagen wordt door Hongarije, en de Boven-Rijnslenk in Duitsland. In beide gebieden is de warmtestroom betrekkelijk hoog en daarmee ook de temperaturen in de ondergrond. Mede door gunstige hydrogeologische eigenschappen van de sediment-opvulling in het Pannonisch Bekken vindt hier winning van warmte plaats met name ten behoeve van kasverwarming.

De vraag is of de lokaties met boven-gemiddelde temperatuurtoename met de diepte in de Slenk van Venlo en in de Betuwe ook op één of andere wijze verband houden met verhoogde warmtestroom door geodyna-

mische processen, zoals het geval is in de Boven-Rijnslenk. Op deze vraag wordt hier niet ingegaan. Voor een uitwerking van recente inzichten in geodynamische processen in West en Centraal Europa volgens de theorie van de globale tektoniek (plaattektoniek) wordt verwezen naar Ziegler (1982).

Bij interpretatie van het ondergrondse temperatuurveld in termen van geodynamische processen moet rekening gehouden worden met de tijd van optreden hiervan. Deze processen zijn ongedurig. Geologisch komt dit tot uiting in het op verschillende plaatsen en tijden ontstaan en daarna weer inactief worden van slenk- en breuksystemen in de aardkorst. Van de ouderdom van een continentaal slenkstelsel, dat niet is uitgegroeid tot een oceaانبekken, hangt af of daarin nog temperatuur-anomalieën heersen of niet meer.

Bij een relatief ondiep voorkomen van heet materiaal in de aarde, en daarmee gepaard gaande structurele verschijnselen in de vorm van breukzones en sedimentlichamen, zijn de ondergrondse omstandigheden gunstig voor het optreden van hydrothermale convectie en (of) voor advection van aardwarmte met grondwater, dat deelneemt aan de hydrologische kringloop. Waar deze transportverschijnselen optreden, is de afvoer van aardwarmte naar het aardoppervlak intensiever dan in gebieden waar de warmte niet alleen door geleiding omhoog stroomt. Langs de stroompaden van grondwater, dat afkomstig is uit de diepte, heersen hogere temperaturen dan daarbuiten. Een sleutel tot aanvullend inzicht is de analyse van hydrochemische gegevens van grondwatermonsters. Het is op voorhand niet uit te sluiten, dat de betrekkelijk hoge temperaturen in de ondergrond van de Venlo-Slenk en de Betuwe in verband te brengen zijn tot geotektonische processen.

5. VERWIJZINGEN

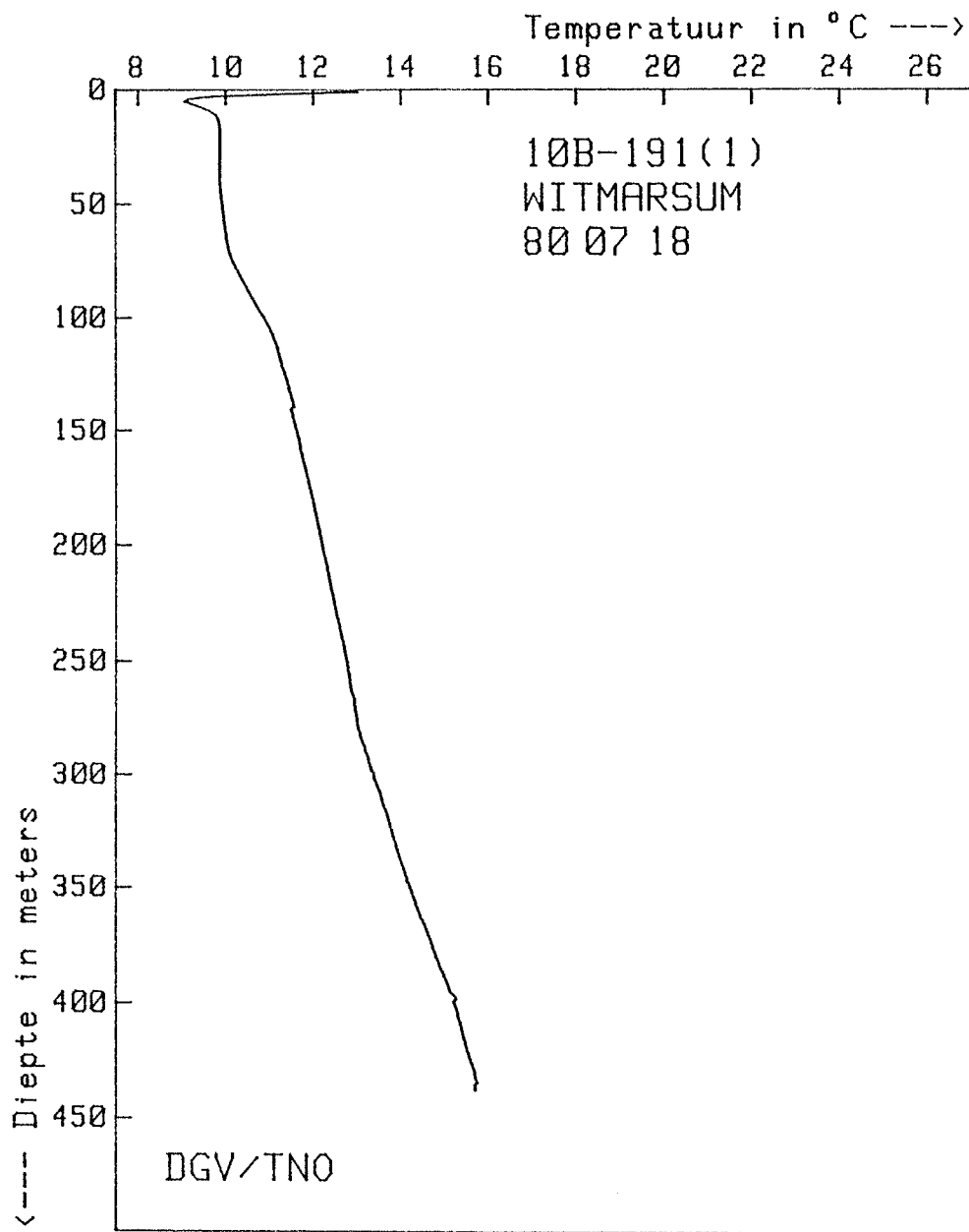
Dalfsen, W. van (1981). The shallow subsurface temperature field in The Netherlands. DGV-TNO-rapport, nr. OS 81-05

Montfrans, H.M. van (1975). Toelichting bij de ondiepe breukenkaart met diepteligging van de Formatie van Maassluis. In: Zagwijn W.H., Van Staalduinen, C.J., (redactie) Toelichting bij Geologische Overzichtskaarten van Nederland, Rijks Geologische Dienst, Haarlem, pp. 103-108

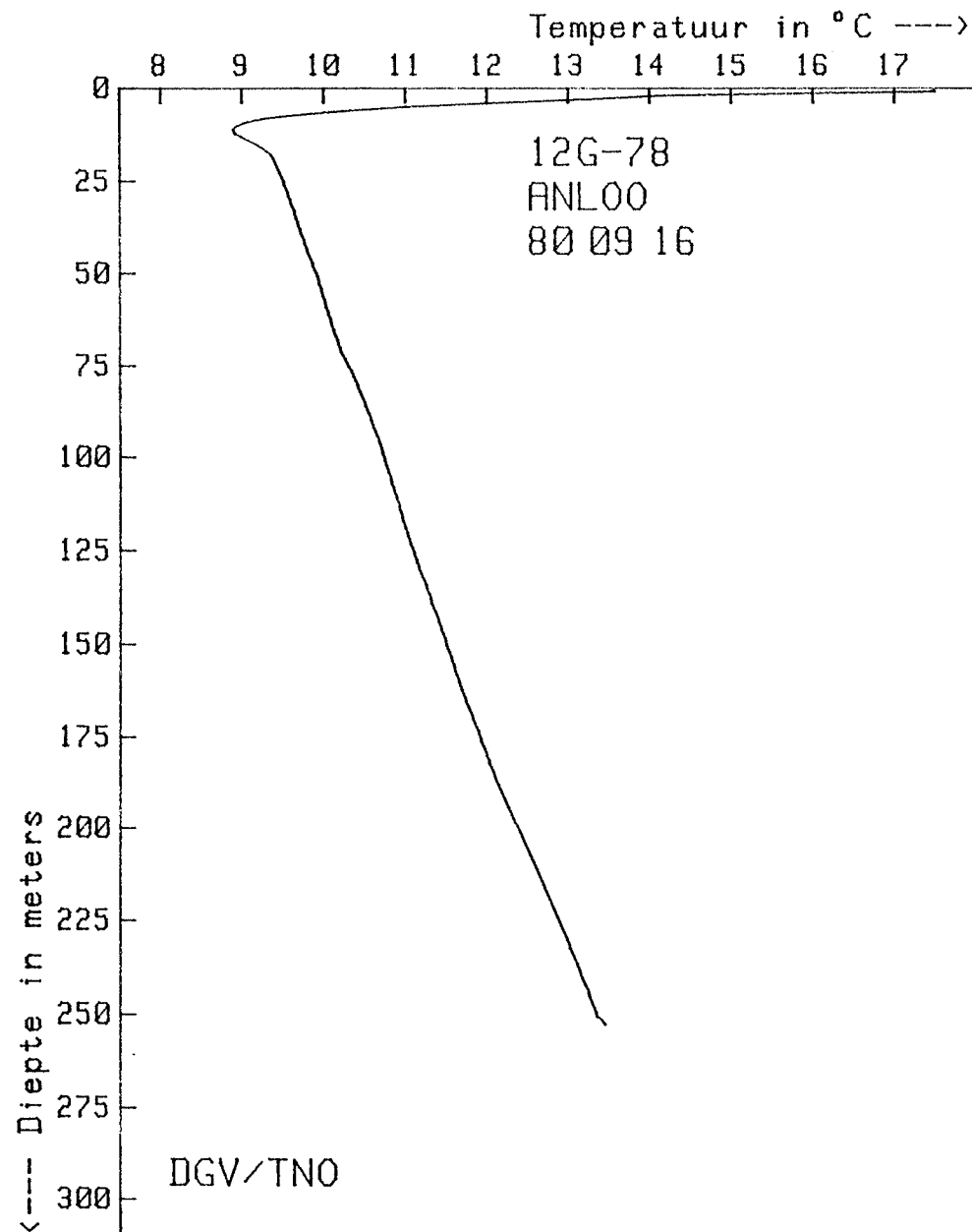
Smith, L., Chapman, D.S. (1983). On the thermal effects of groundwater flow, 1. Regional Scale Systems. J. Geoph. Res., 88, B1: 593-608

Turcotte, D.L., Schubert, G. (1982). Geodynamics, Applications of Continuum Physics to Geological Problems. John Wiley & Sons, New York, p. 58

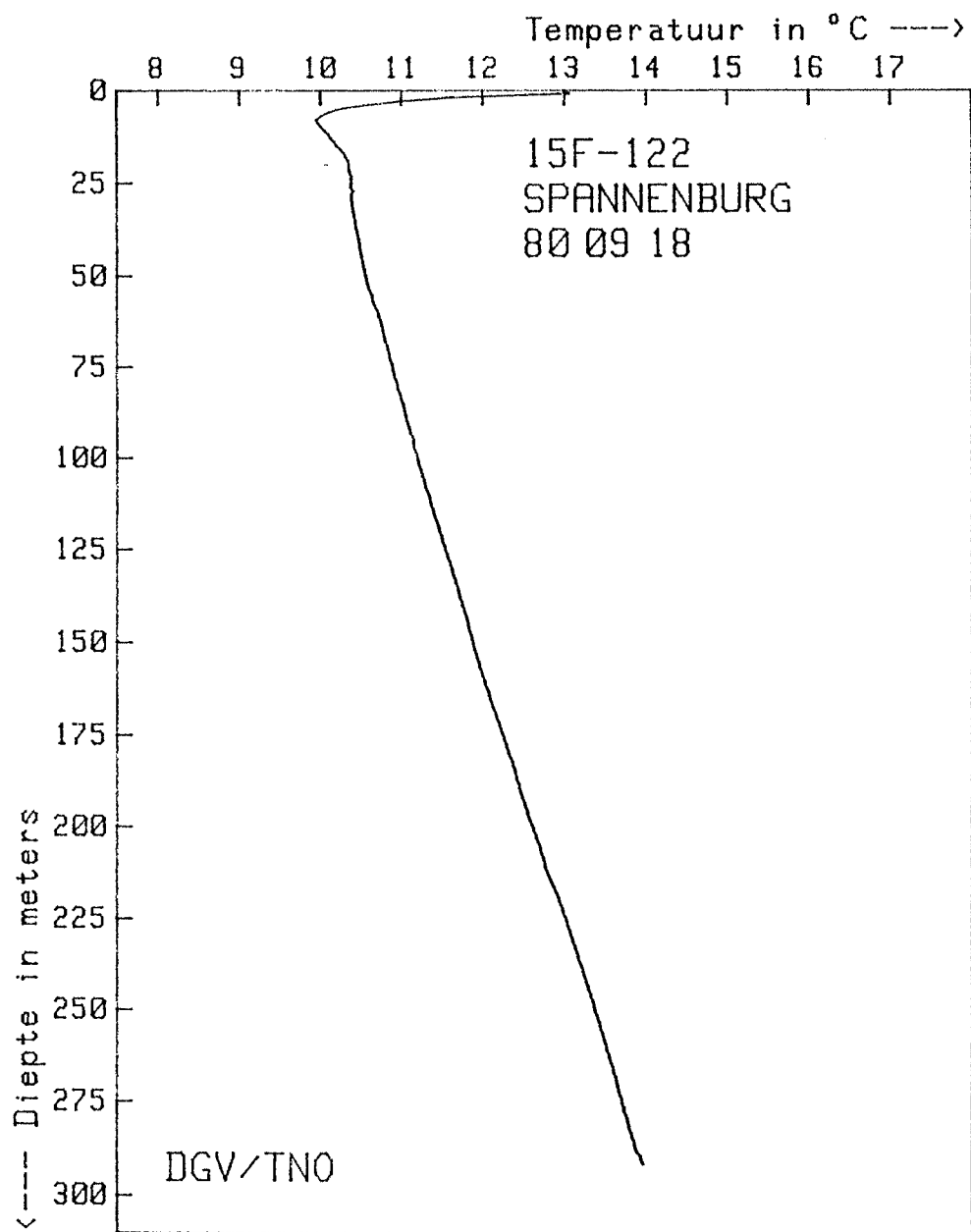
Ziegler, P.A. (1982). Geological Atlas of Western and Central Europe. Shell Internationale Petroleum Maatschappij BV, Den Haag



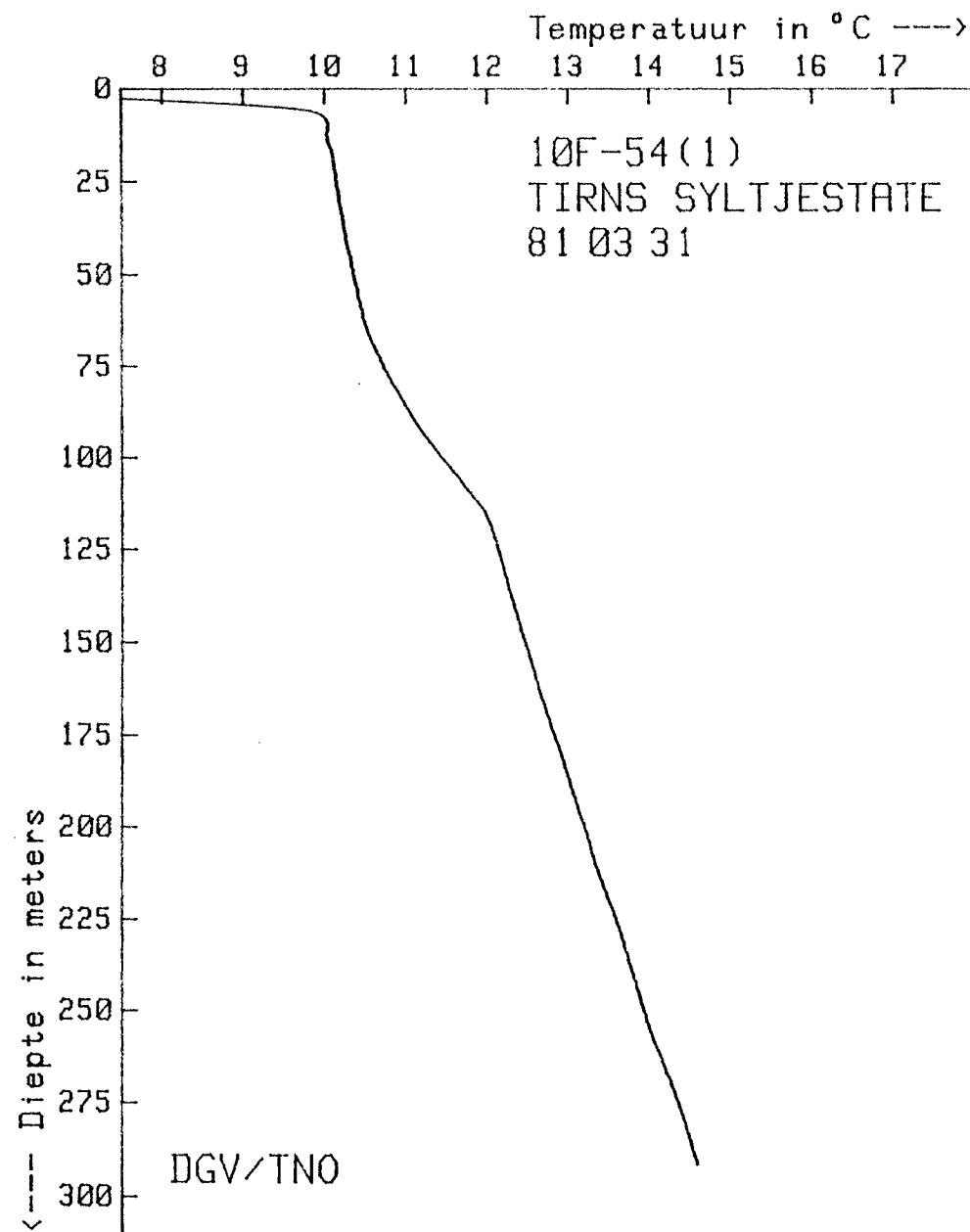
BIJLAGE 1: WAARNEMINGSPUT 10B-191(1)



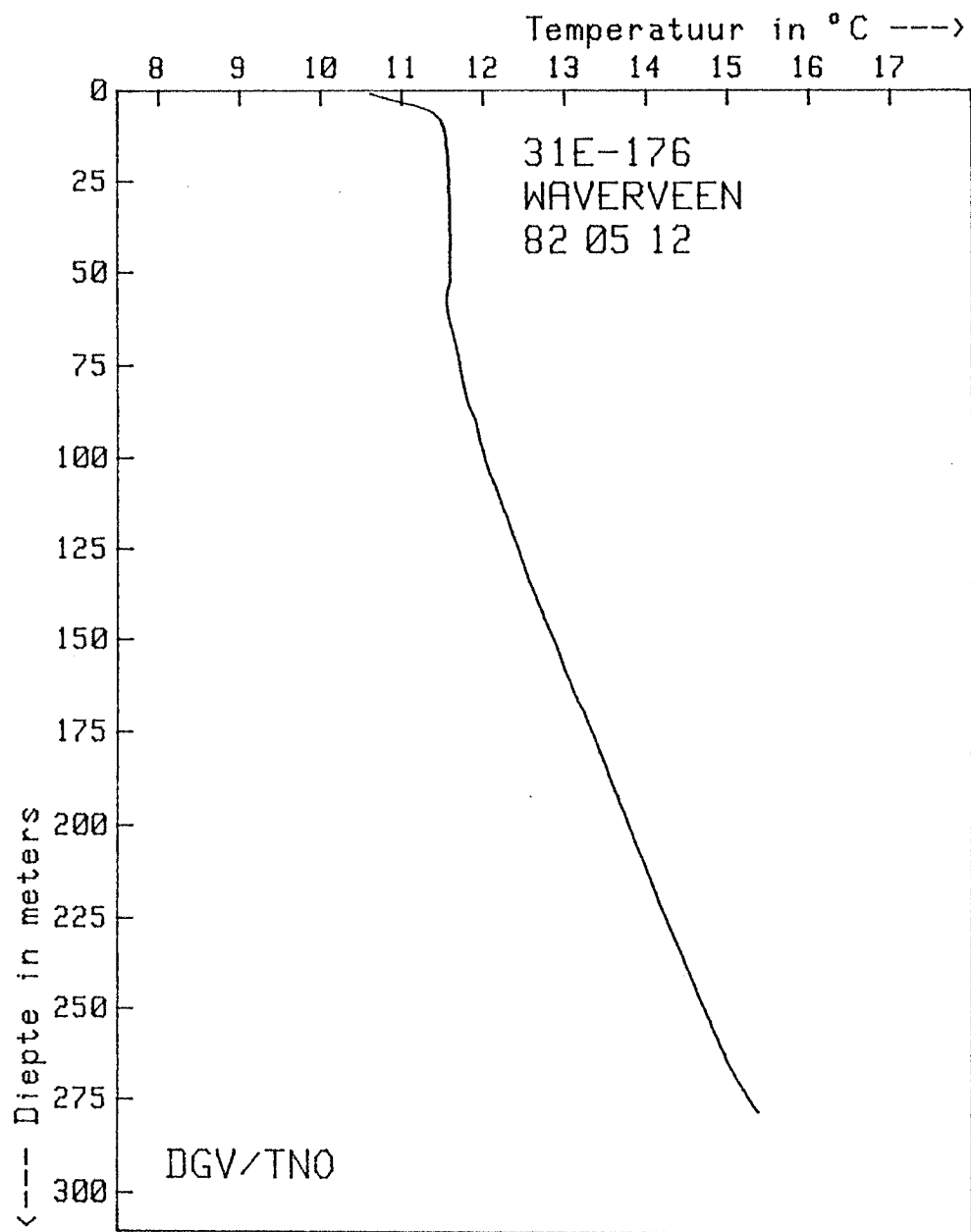
BIJLAGE 2: WAARNEMINGSPUT 12G-78



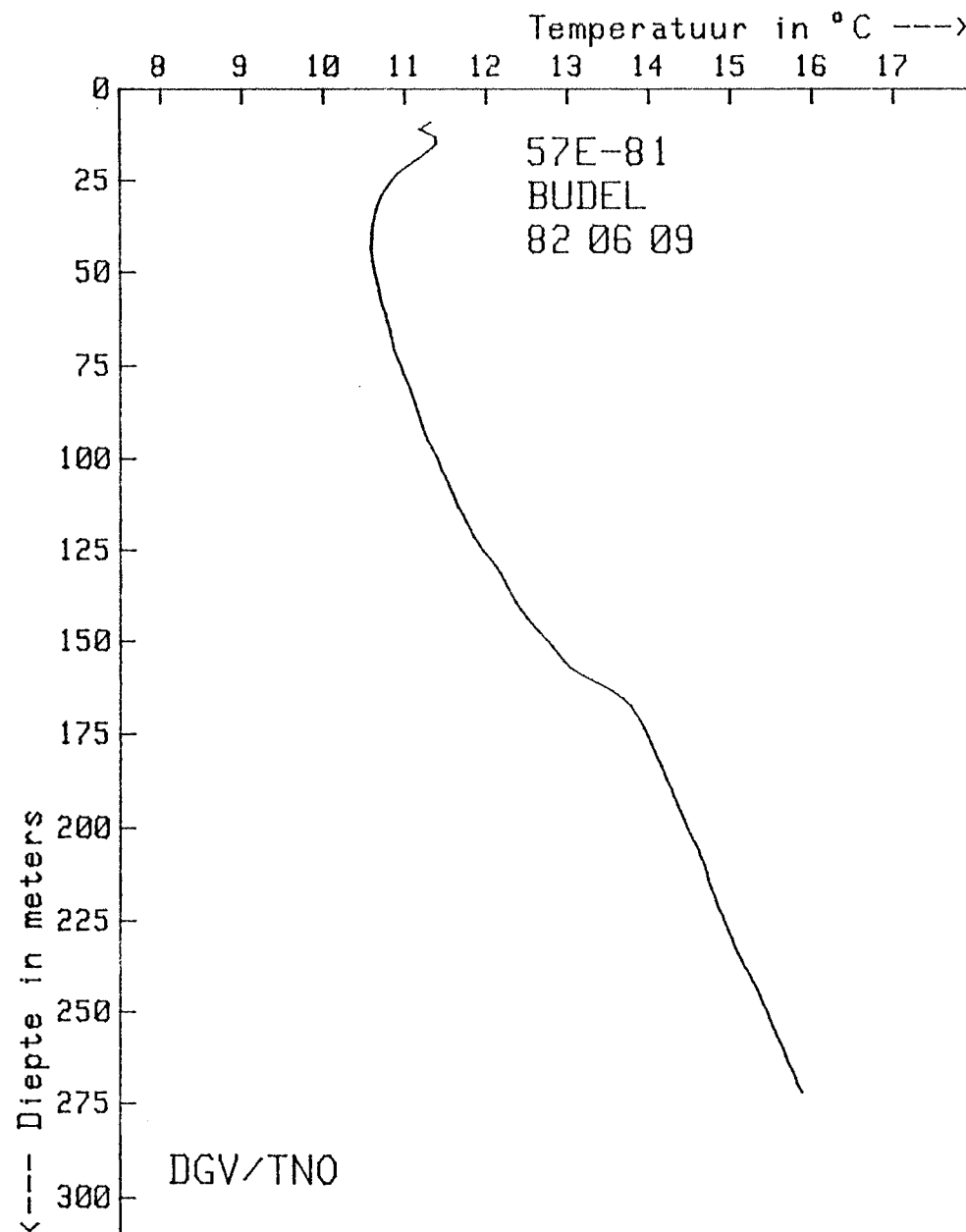
BIJLAGE 3: WAARNEMINGSPUT 15F-122



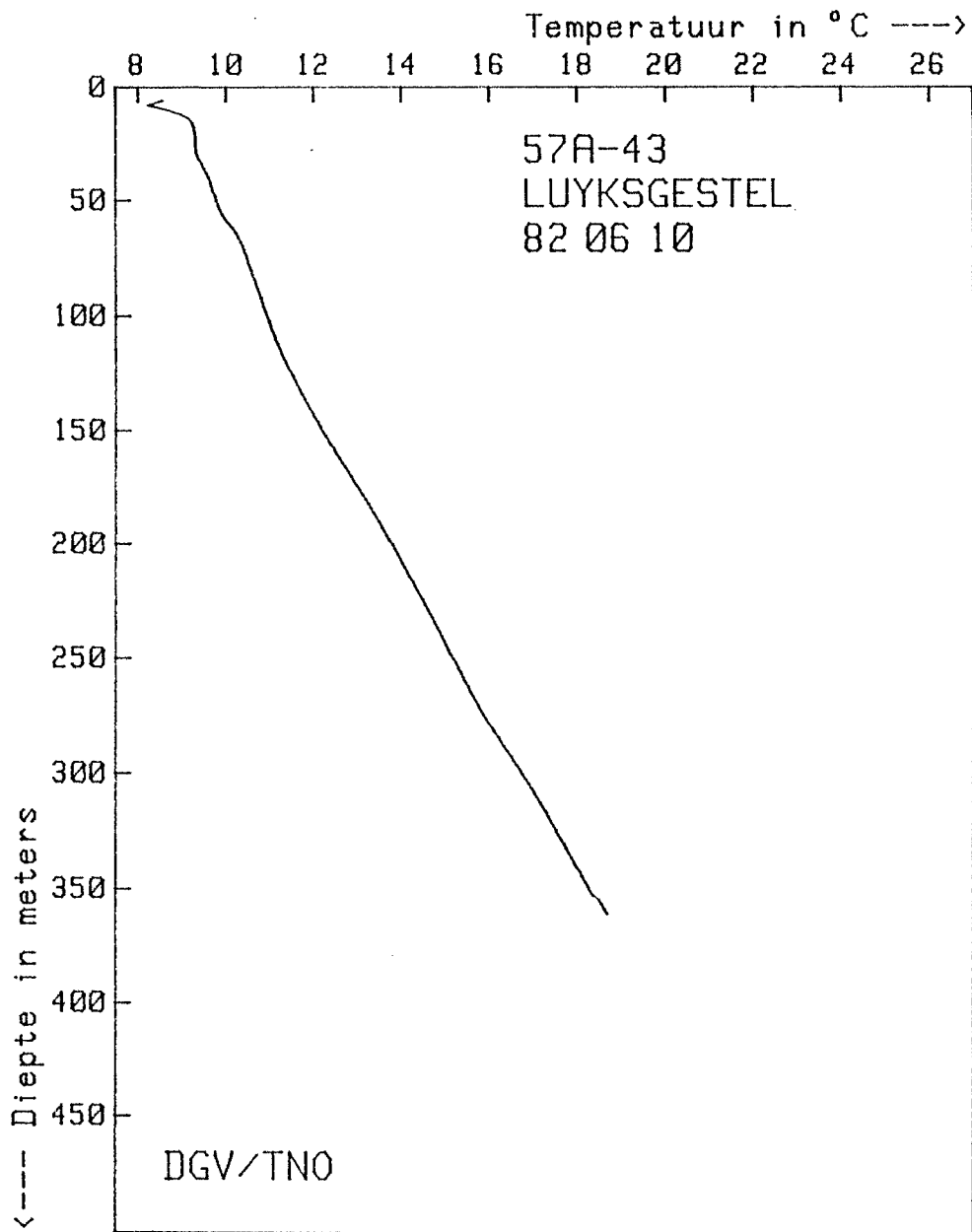
BIJLAGE 4: WAARNEMINGSPUT 10F-54(1)



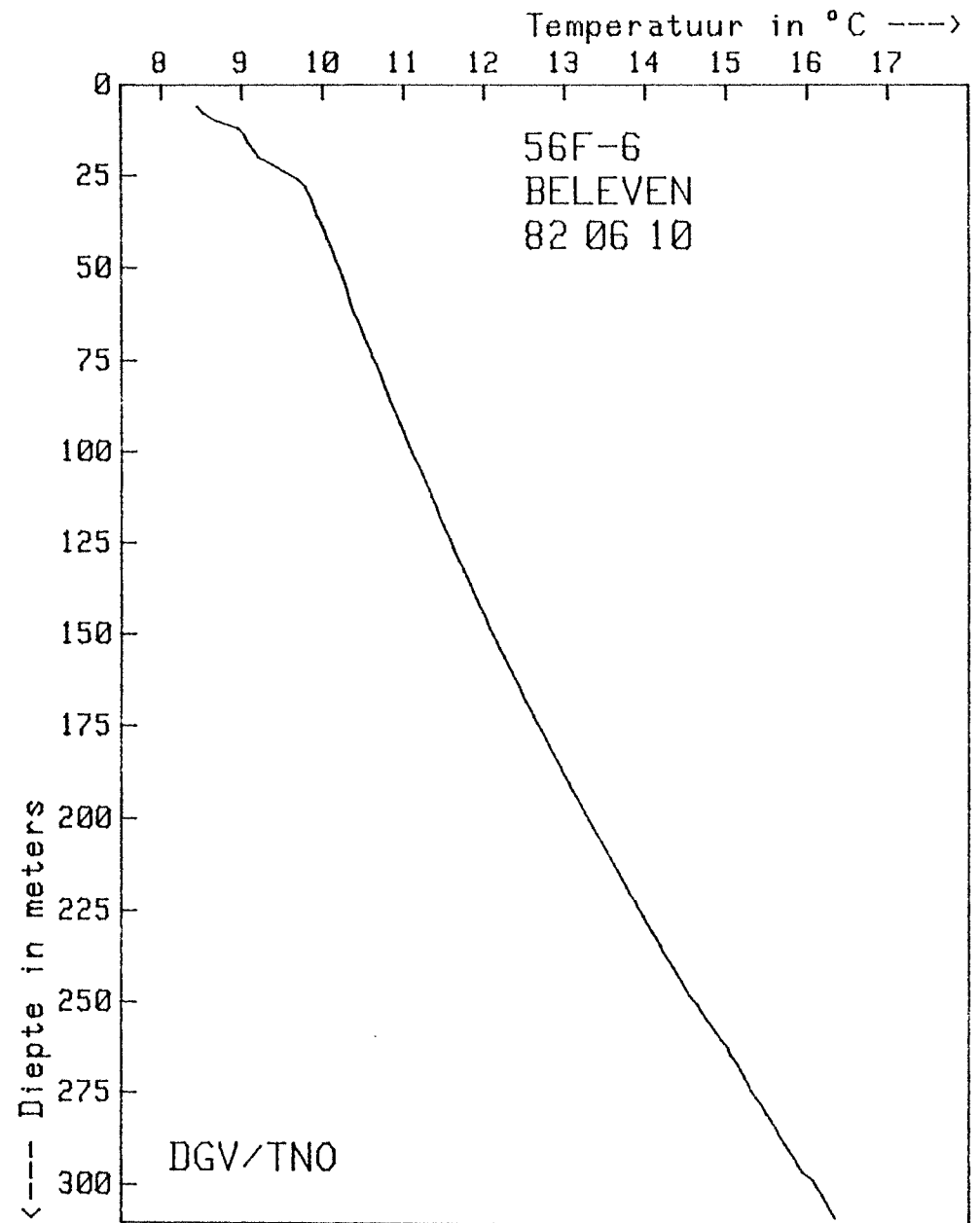
BIJLAGE 5: WAARNEMINGSPUT 31E-176



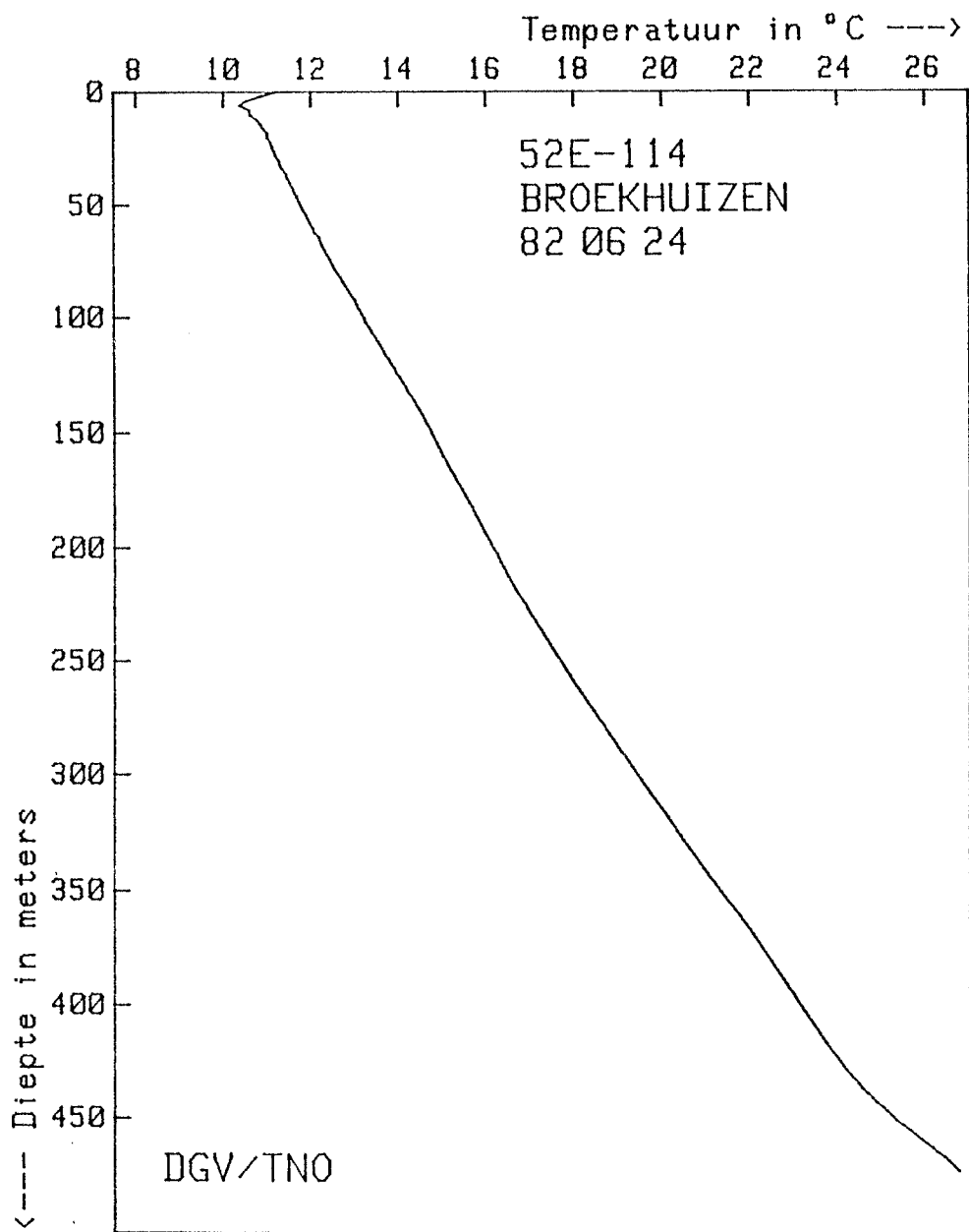
BIJLAGE 6: WAARNEMINGSPUT 57E-81



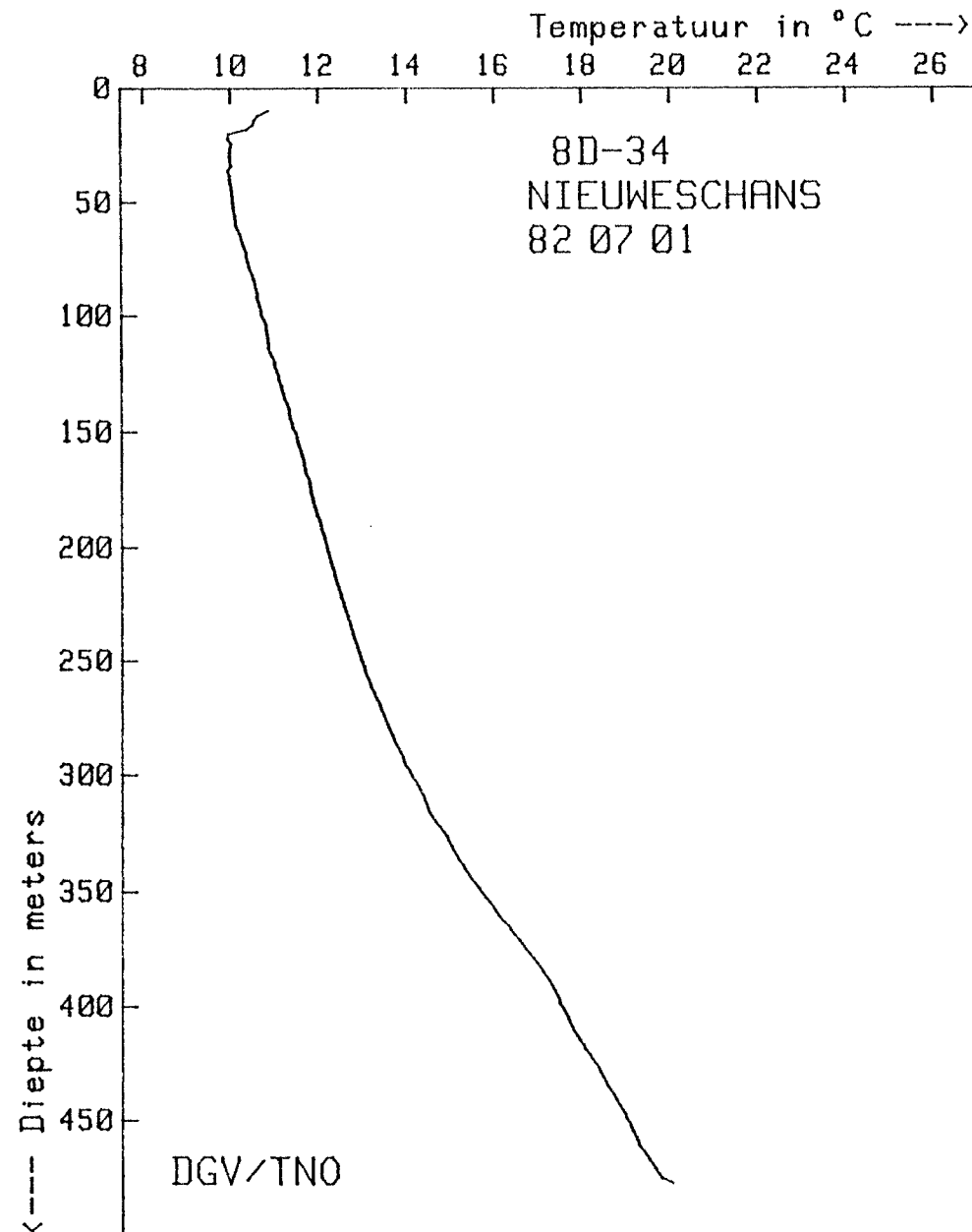
BIJLAGE 7: WAARNEMINGSPUT 57A-43



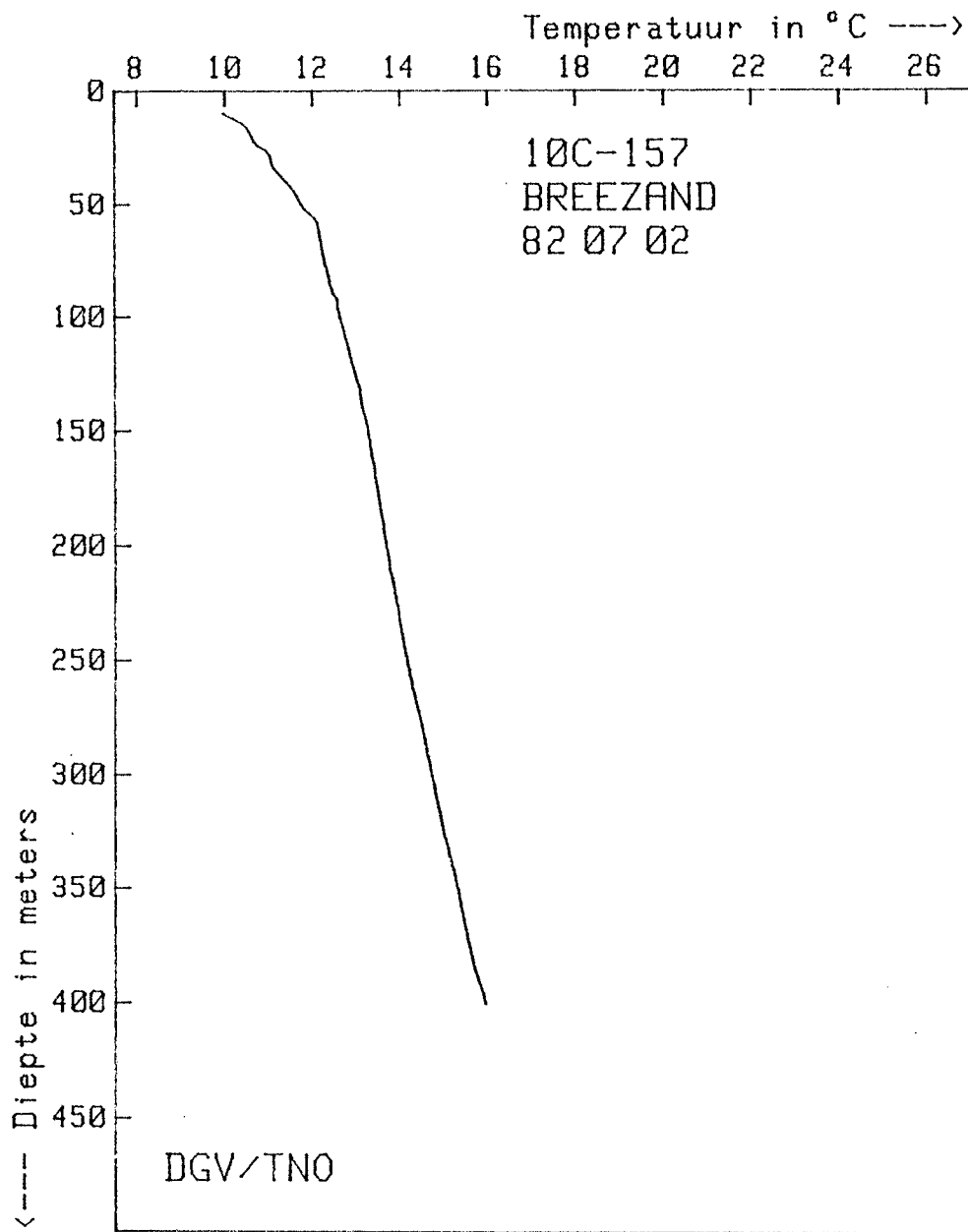
BIJLAGE 8: WAARNEMINGSPUT 56F-6



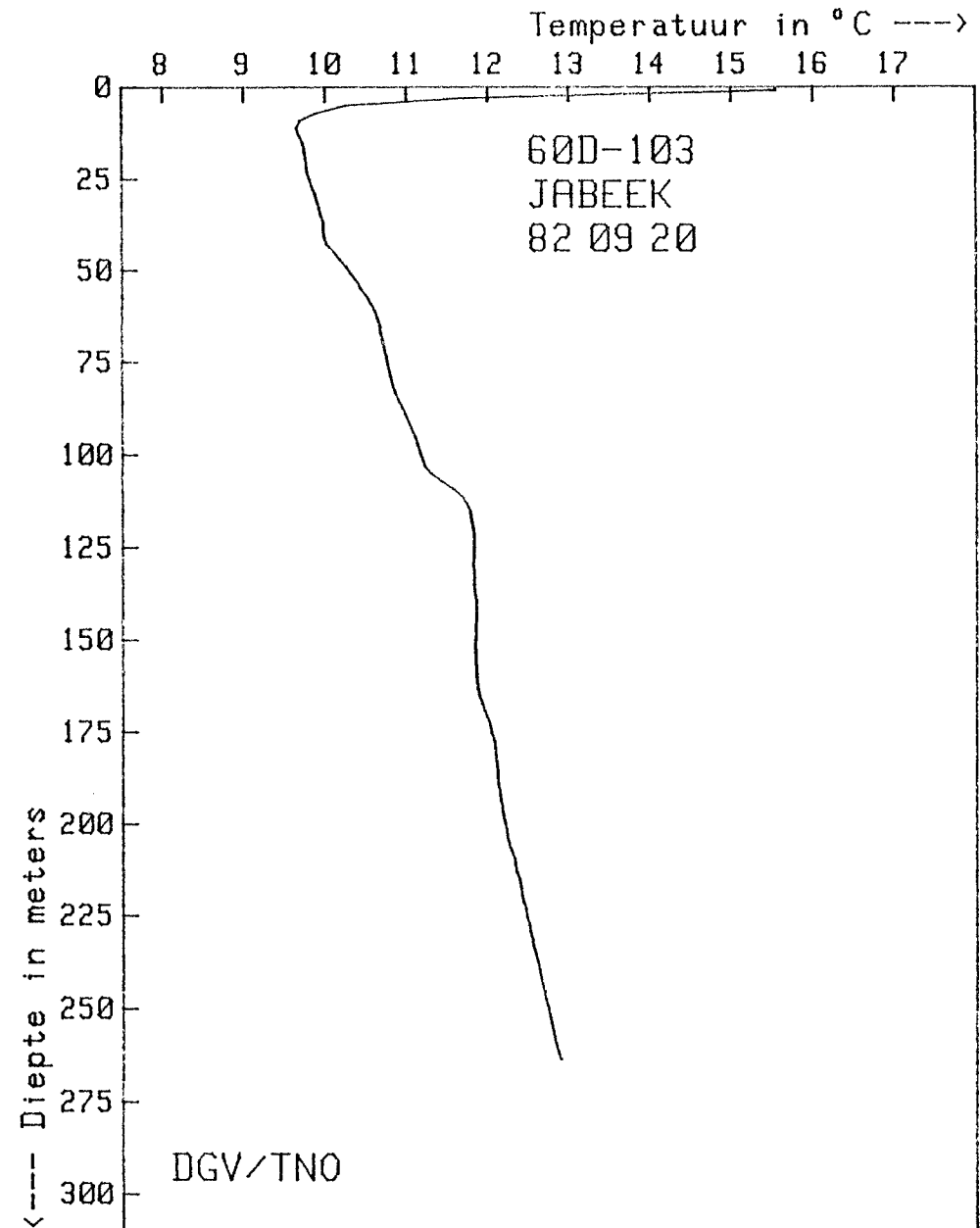
BIJLAGE 9: WAARNEMINGSPUT 52E-114



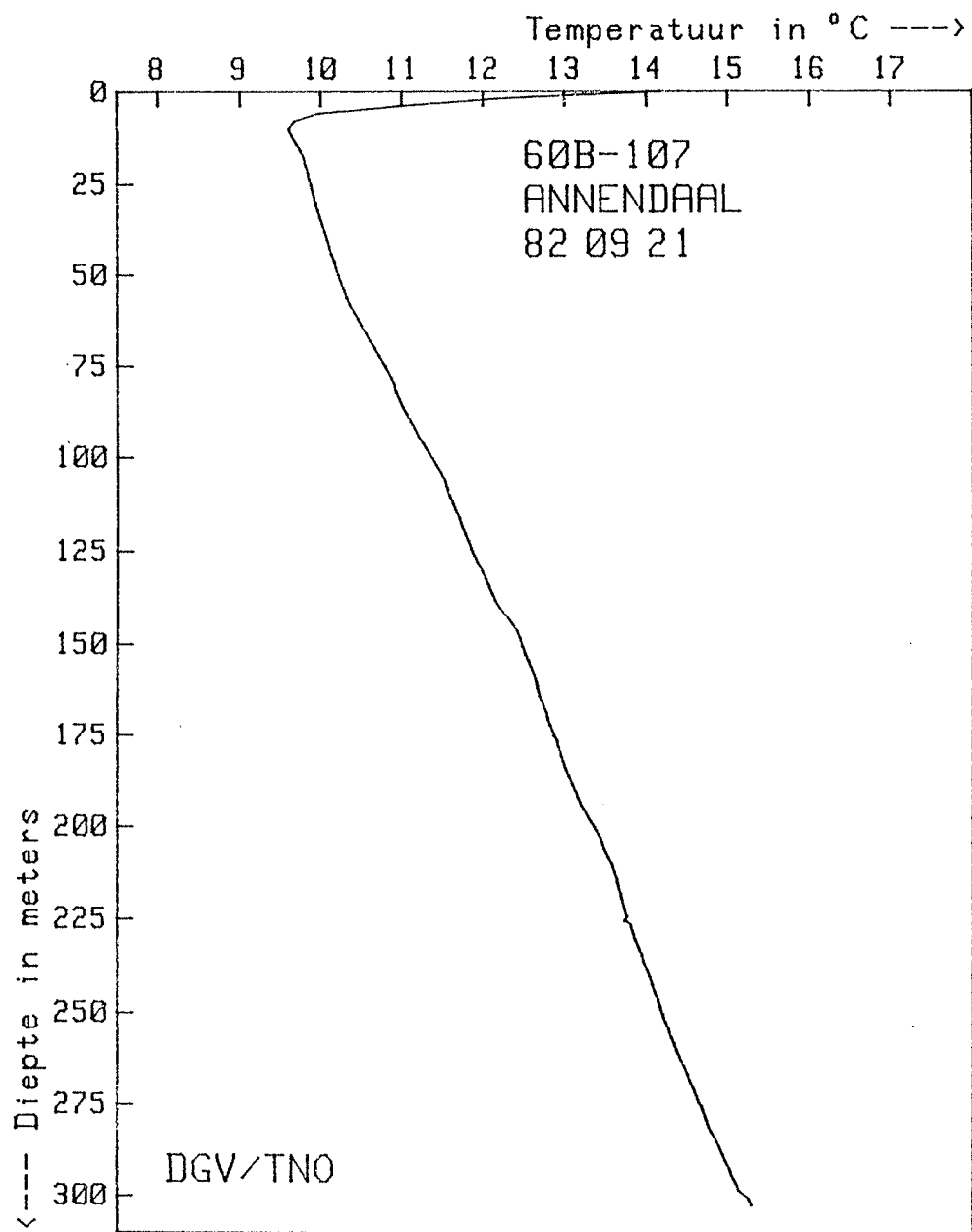
BIJLAGE 10: WAARNEMINGSPUT 8D-34



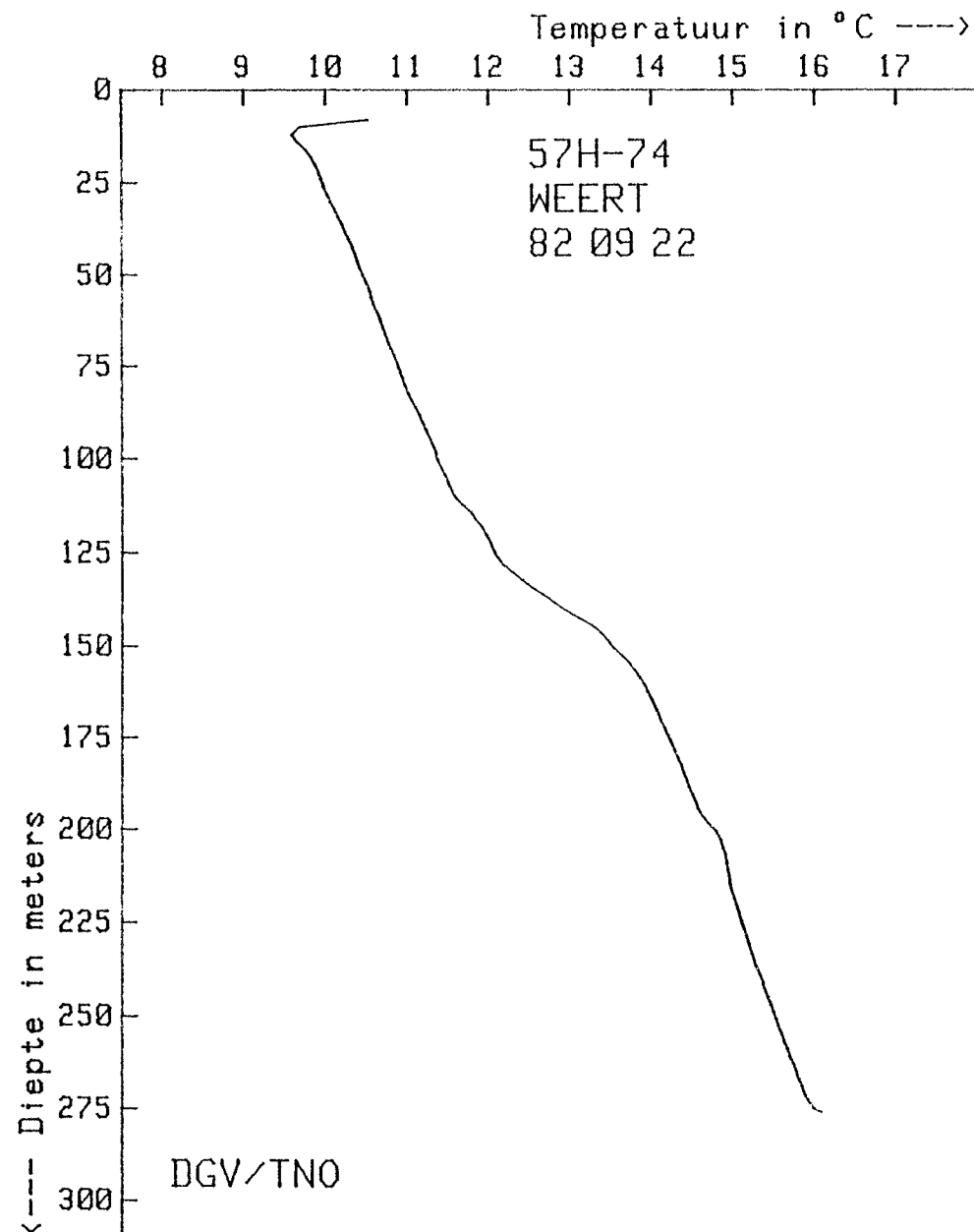
BIJLAGE 11: WAARNEMINGSPUT 10C-157



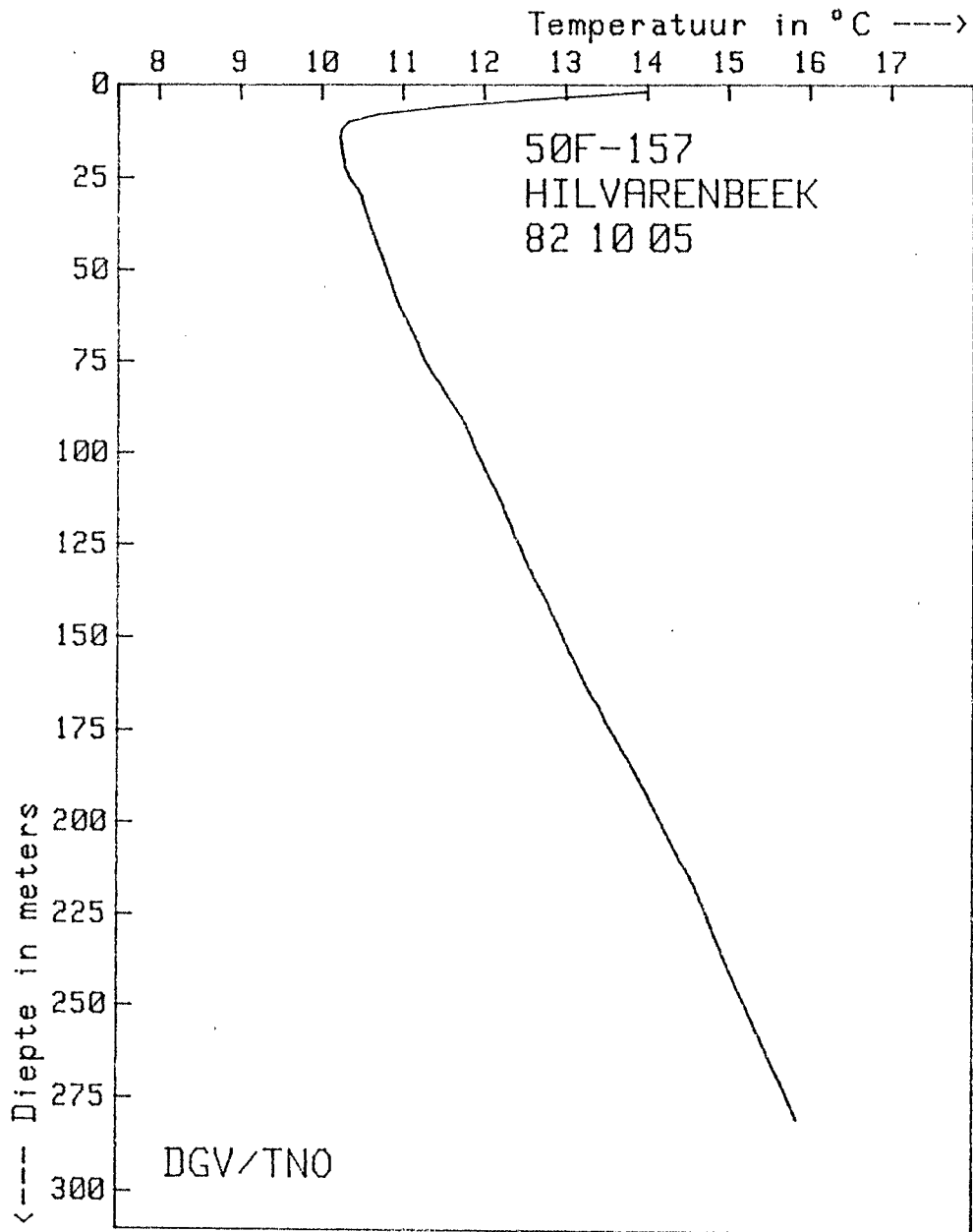
BIJLAGE 12: WAARNEMINGSPUT 60D-103



BIJLAGE 13: WAARNEMINGSPUT 60B-107



BIJLAGE 14: WAARNEMINGSPUT 57H-74



BIJLAGE 15: WAARNEMINGSPUT 50F-157