

**TNO-rapport**

**TNO-034-UT-2010-00473/A**

**Inventarisatie aardwarmtepotentie Nederlandse  
ondergrond; geologische onzekerheden en te  
nemen maatregelen**

Datum	18 maart 2010
Auteur(s)	L. Kramers, G.-J. Vis, M.P.D. Pluymaekers, J.D.A.M. van Wees, H.M. Mijlief
Opdrachtgever	Ministerie LNV, Ministerie EZ
Projectnummer	034.22748
Rubricering rapport	
Titel	
Samenvatting	
Rapporttekst	
Bijlagen	
Aantal pagina's	58 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	5

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

## Inhoudsopgave

	<b>Noot vooraf.....</b>	<b>3</b>
	<b>Samenvatting .....</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding.....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Aanpak .....</b>	<b>7</b>
2.1	Maatregelen gebiedenkaart.....	11
<b>3</b>	<b>Maatregelen .....</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Gebruik kaarten en tabellen.....</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>Ondertekening .....</b>	<b>20</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
	A Maken van aard ondergrond kaart	
	B Maken van datadichtheidskaart	
	C Geothermisch vermogenskaart	
	D Aardwarmte onzekerheidsgebieden kaart	
	E Maatregelen aardwarmte kaart	

## Noot vooraf

Een van de voorwaarden binnen de garantieregeling voor het boren naar aardwarmte is dat de kans op een succesvolle boring minimaal 90% moet zijn. Deze grens is gesteld, omdat het voor de doorontwikkeling van aardwarmte essentieel is dat geslaagde boringen worden gerealiseerd. In juni 2009 is gebleken dat bij twee voorgenomen aardwarmteprojecten deze slagingskans gepaard gaat met een te klein vermogen, wat resulteert in een onacceptabele terugverdientijd. Naar aanleiding hiervan is TNO gevraagd onderliggend onderzoek te doen.

In het rapport komen verschillende mogelijke maatregelen aan de orde. TNO is niet gevraagd om aan te geven welke actoren de genoemde maatregelen het beste zouden kunnen treffen. Diverse private partijen en overheden zouden hierbij een rol kunnen spelen.

De resultaten en kaarten in dit rapport zijn gebaseerd op een regionale kartering van de ondergrond van Nederland. De gegevens die hieraan ten grondslag liggen hebben een regionaal karakter en zijn gebaseerd op grootschalige studies van geologische parameters in de bestudeerde aquifers. Daarom dienen de resultaten en kaarten in dit rapport uitsluitend gebruikt te worden voor regionale evaluatie. De resultaten en kaarten in dit rapport dienen niet gebruikt te worden voor lokale aardwarmtestudies. Tevens dienen de resultaten en kaarten in dit rapport niet gebruikt te worden voor bedrijfsmatige doeleinden. Vooraf aan de berekeningen zijn aannames gemaakt over onder andere de COP en een cut-off waarde voor het gewenste vermogen. Wijziging van deze aannames zullen tot andere uitkomsten leiden.

De resultaten en kaarten in dit rapport zijn met grote zorg samengesteld. Ondanks deze zorgvuldigheid is het mogelijk dat de gepresenteerde informatie onvolledigheden, onjuistheden of fouten bevat. Daarnaast is het mogelijk dat voortschrijdend inzicht ervoor zorgt dat een gedeelte van de gepresenteerde resultaten en kaarten op termijn door nieuwe gegevens niet meer geheel actueel is. TNO is niet verantwoordelijk voor eventuele fouten of andere consequenties die hiervan het gevolg zijn.

## Samenvatting

In 2009 is in het kader van de garantieregeling aardwarmte een rekenprogramma (DoubletCalc) ontwikkeld waarmee aan de hand van geologische parameters een inschatting van het geothermische vermogen kan worden gemaakt. Om aanspraak te maken op de garantstelling moet bij de 1e pilot-opstelling het P90-vermogen groter zijn dan of gelijk zijn aan het gewenste geothermische vermogen. In juni 2009 is gebleken dat bij twee voorgenomen aardwarmteprojecten deze slagingskans gepaard gaat met een te klein vermogen, wat resulteert in een onacceptabele terugverdientijd. Bij een slagingskans van 50% wordt wel voldoende vermogen gehaald.

In dit rapport wordt ingegaan op de oorzaken van de grote spreiding tussen P50 en P90 vermogen en welke maatregelen genomen kunnen worden om deze spreiding te verkleinen. Hiervoor zijn aquifers gekarteerd, waarvan verwacht wordt dat deze potentie hebben voor het winnen van aardwarmte. Het doel is om voor elk van deze aquifers gebieden te identificeren waarbinnen een bepaalde maatregel kan leiden tot verkleining van de onzekerheid. De gebieden worden weergegeven in een maatregelengebiedenkaart, die is gebaseerd op een vooraf gedefinieerde maatregelentabel. In deze studie zijn maatregelen gebiedenkaarten van aquifers uit de Slochteren Fm., het Onder Germaans Trias en het Onder Krijt gekarteerd. De aquifers uit het Tertiair zijn niet meegenomen in de inventarisatie, omdat daarvan over het algemeen de temperatuur te laag is. Aquifers uit het Jura zijn niet geïnventariseerd, omdat hiervan nog geen goede kartering bestaat.



# 1 Inleiding

In 2009 is in het kader van de garantieregeling aardwarmte een rekenprogramma (DoubletCalc) ontwikkeld waarmee aan de hand van geologische parameters een inschatting van het geothermische vermogen kan worden gemaakt. Om aanspraak te maken op de garantstelling moet bij de 1e pilot-opstelling het P90-vermogen, dat conform een geologische evaluatie behaald kan worden, groter zijn dan of gelijk zijn aan het gewenste geothermische vermogen. In juni 2009 is gebleken dat bij twee voorgenomen aardwarmteprojecten deze slagingskans gepaard gaat met een te klein vermogen, wat resulteert in een onacceptabele terugverdientijd. Bij een slagingskans van 50% wordt wel voldoende vermogen gehaald.

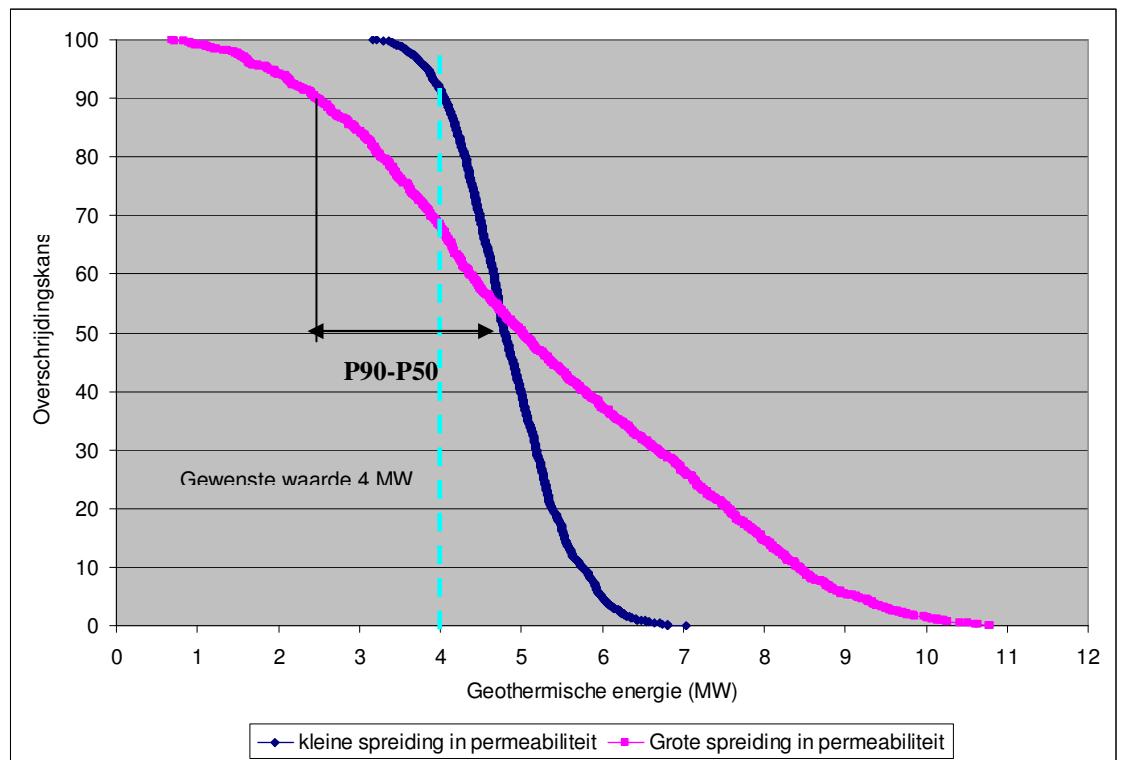
Tijdens een overleg tussen deskundigen op het gebied van geologie, beleid en glastuinbouw is geconcludeerd dat de grote spreiding tussen P90 en P50 (Figuur 1) verschillende oorzaken heeft, waaronder beperkte informatie over de ondergrond. Deze beperkte informatie resulteert in een grote onzekerheid/spreiding in de parameters van de watervoerende laagpakketten (aquifers).

In dit rapport wordt ingegaan op de oorzaken van de grote spreiding tussen P90 en P50 en welke maatregelen worden aanbevolen om deze spreiding te verkleinen. Voor enkele gebieden wordt ook een stimuleringsmaatregel voorgesteld, namelijk het verlagen van het P90 criterium. Hiervoor zijn aquifers gekarteerd, waarvan verwacht wordt dat deze potentie hebben voor het winnen van aardwarmte. Het doel is om voor elk van deze aquifers gebieden te identificeren waarbinnen een bepaalde maatregel kan leiden tot verkleining van de onzekerheid in de aquiferparameters. De gebieden worden weergegeven in een maatregelengebiedenkaart, die is gebaseerd op een vooraf gedefinieerde maatregelentabel. De aquifers uit het Tertiair zijn niet meegenomen in de inventarisatie, omdat daarvan in het algemeen de temperatuur te laag is. Aquifers uit het Jura zijn niet geïnventariseerd, omdat hiervan nog geen goede kartering bestaat.

In de volgende hoofdstukken zal ingegaan worden op de definitie van de sturende aquiferparameters (geothermisch vermogen en onzekerheid daarin, datadichtheid en aard van de ondergrond<sup>1</sup>) en omschrijving van de maatregelen. Er wordt een beknopte uitleg van de methodiek en het gebruik van de kaarten en tabellen gegeven. In de methodiek zijn meerdere stadia te onderscheiden. De methodiek wordt per stadium in meer detail beschreven in de Appendices A t/m D. De resultaten van deze studie worden weergegeven in de Appendices E en F.

---

<sup>1</sup> In deze studie wordt de ondergrond geclassificeerd als *robust* of *grillig*. Dit hangt samen met de aanwezigheid en de mate van onzekerheid in de dikte van een aquifer.



Figuur 1. Geothermisch vermogen uit DoubletCalc. Er zijn twee scenario's gepresenteerd. Op de permeabiliteit na zijn alle parameters identiek. Dit illustreert de gevoeligheid voor het verschil tussen de P90 en P50 vermogen ten gevolge van de onzekerheid in de evaluatie van de ondergrond. Een steile curve geeft een kleine onzekerheid weer, een vlakkere curve geeft een grotere onzekerheid weer.

## 2 Aanpak

Om warmte uit een aquifer te winnen dient deze aan een aantal voorwaarden te voldoen. Naast een voldoende hoge temperatuur en porositeit, is een hoge transmissiviteit (een maat voor dikte en permeabiliteit/doorlatendheid van de aquifer) essentieel om een gewenst vermogen te behalen. De benodigde gegevens om de transmissiviteit in te schatten zijn voornamelijk afkomstig uit gas- en olie-exploratie en -productie activiteiten. In regio's met een lage prospectiviteit voor gas en olie zijn minder (exploratie-) putten en seismische surveys voorhanden om op een adequate manier bovengenoemde aquifereigenschappen in te schatten. De transmissiviteit van het gesteente is moeilijk in te schatten, als gevolg van onder andere laterale heterogeniteit (lokale en regionale verschillen in de aquifereigenschappen en structuur van de ondergrond). Zodra er weinig gegevens beschikbaar zijn in een gebied, leidt dit ook tot een grote onzekerheid in de transmissiviteit. Een hoge onzekerheid in de transmissiviteit leidt tot een grote onzekerheid in het verwachte geothermische vermogen.

Om aanspraak te kunnen maken op de garantstelling moet bij de 1e pilot-opstelling het P90-vermogen dat conform een geologische evaluatie behaald kan worden, groter of gelijk zijn aan het gewenste geothermische vermogen. Voor twee aardwarmteprojecten bleek dit niet haalbaar, terwijl P50 wel gehaald kon worden. Om aardwarmtewinning in Nederland verder te ontwikkelen is het van belang om het verschil tussen P90 en P50 waarden te verkleinen wanneer de P90 onder het gewenste geothermisch vermogen ligt. Van de andere kant is het van belang om de onzekerheid te verkleinen voor gebieden waar de P50 beneden het gewenste vermogen ligt. Het verschil tussen P90 en P50 van het geothermische vermogen is het gevolg van de spreiding in dikte, porositeit en permeabiliteit. Dit hangt samen met de datadichtheid en aard van de ondergrond (aanwezigheid en geologische structuur van een aquifer). Om in deze situaties de spreiding tussen P90 en P50 te verkleinen dient de spreiding in de aquifereigenschappen op adequate wijze beperkt te worden. Extra maatregelen, waaronder acquisitie in putten en seismiek, kunnen de spreiding en dus de onzekerheid verlagen.

Deze studie heeft als doel de problematiek rondom P90 te verkennen en maatregelen te definiëren voor gebieden waar P90 (de minimum voorwaarde waaraan een locatie moet voldoen wil het in aanmerking komen voor de garantieregeling) niet wordt behaald. Het onderzoek leidt tot een maatregelen gebiedenkaart per aquifer waarop in één oogopslag te zien is welke maatregelen genomen kunnen worden om de onzekerheid te verkleinen.

Om tot een maatregelen gebiedenkaart te komen zijn per aquifer zes kaarten gemaakt:

### *1. Aard van de ondergrond (robuust/grillig)*

Voor deze studie zijn de aquifers gekarteerd waarvan verwacht wordt dat deze potentie hebben voor aardwarmtewinning. Deze verwachting is gebaseerd op kennis uit kartering, putgegevens en reservoir-eigenschappen zoals dikte, porositeit en permeabiliteit van de aquifers. De eerste stap in het maken van de aard van de ondergrond kaarten is het bepalen van de aanwezigheid en het begrenzen van de aquifer. Binnen de begrenzing wordt op basis van dikte uit putgegevens middels de kriging-methode de dikte geïnterpoleerd. Voor de aard van de ondergrond is er een onderverdeling gemaakt in robuust en grillig. In gebieden waar een aquifer zeker aanwezig is en een dikte van >20 m heeft, is deze geclassificeerd als robuust. In gebieden waar een aquifer niet aanwezig is, of de aanwezigheid onzeker is, is de aquifer als grillig geclassificeerd. Een aquifer dunner dan 20 m is eveneens als grillig geclassificeerd. Er is daarnaast een bufferzone van 3 km aangehouden aan de randen van de

aquifer en langs structurele hogen. Gebieden binnen deze randzone zijn ook geclassificeerd als grillig. De diktekaarten zijn gemaakt door middel van kriging van de dikte van lithostratigrafische zandsteen intervallen (aquifers). Een uitzondering hierop vormt de Onder-Krijt diktekaart van het West Nederlands Bekken. Hiervoor is gebruik gemaakt van de P50 van netto zanddikte die is gebaseerd op 50 model realisaties van lithofacies in het bekken.

De onzekerheid in aquiferparameters en geologische opbouw van een aquifer zijn verwerkt in de transmissiviteitskaarten. Figuur 2A toont de aard van de ondergrond kaart voor de Slochteren Formatie. Voor een gedetailleerde uitleg en resultaten zie Appendix A.

## *2. Datadichtheid (hoog/laag)*

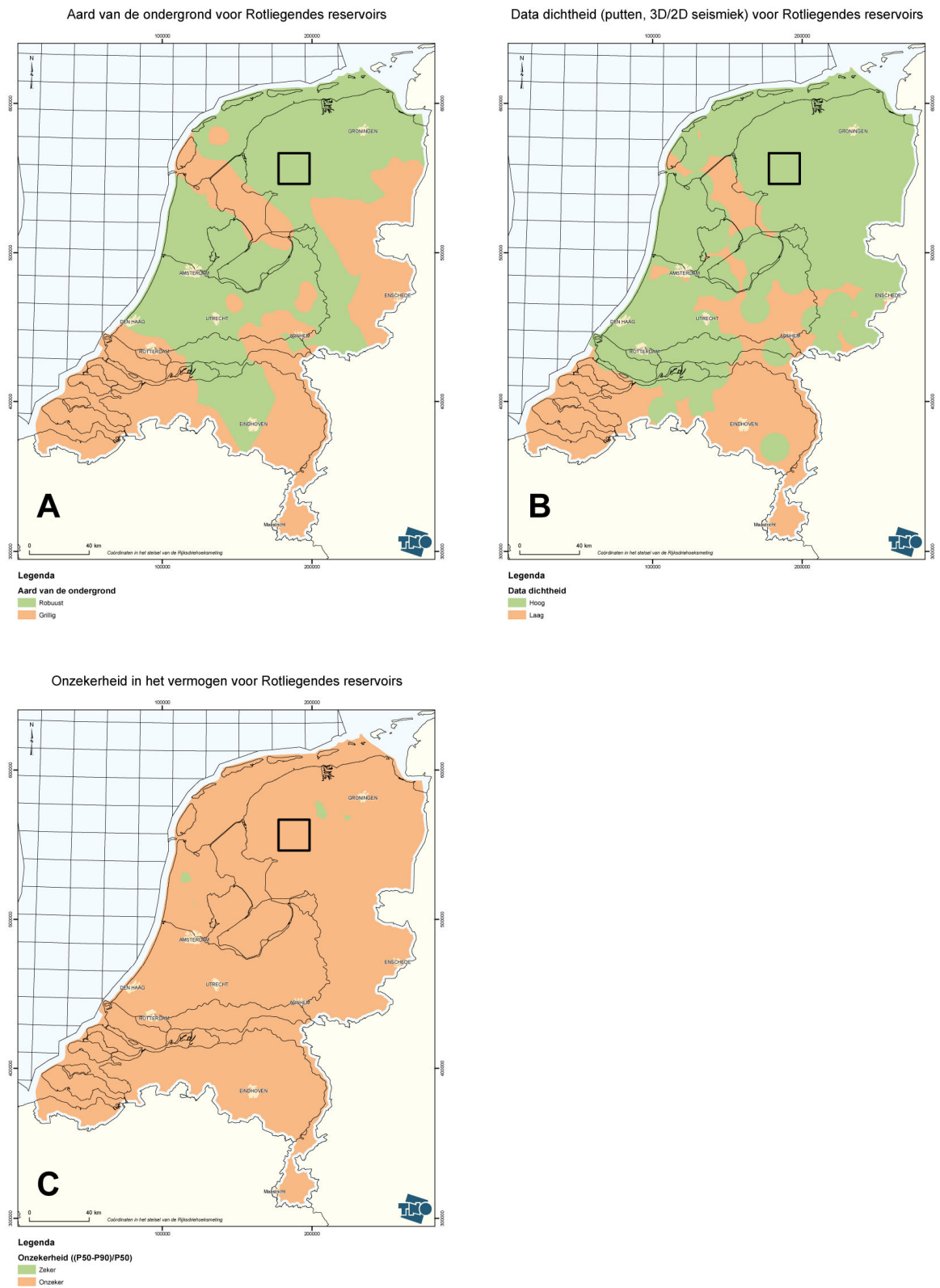
Om een inschatting te kunnen maken van de aquiferkwaliteit is gebruik gemaakt van putgegevens en seismiek. Voor het bepalen van de datadichtheid zijn de beschikbare putten, 3D en 2D seismiek afzonderlijk in kaart gebracht. Vervolgens zijn deze kaarten samengevoegd, waarbij aan elke kaart een gewicht is toegekend (putten>3D>>2D). De grenswaarde die zorgt voor de hoog/laag verdeling is een “expert beoordeling”. Figuur 2B toont de datadichtheid kaart van de Slochteren Formatie. Voor een gedetailleerde uitleg zie Appendix B.

## *3. Geothermisch vermogen*

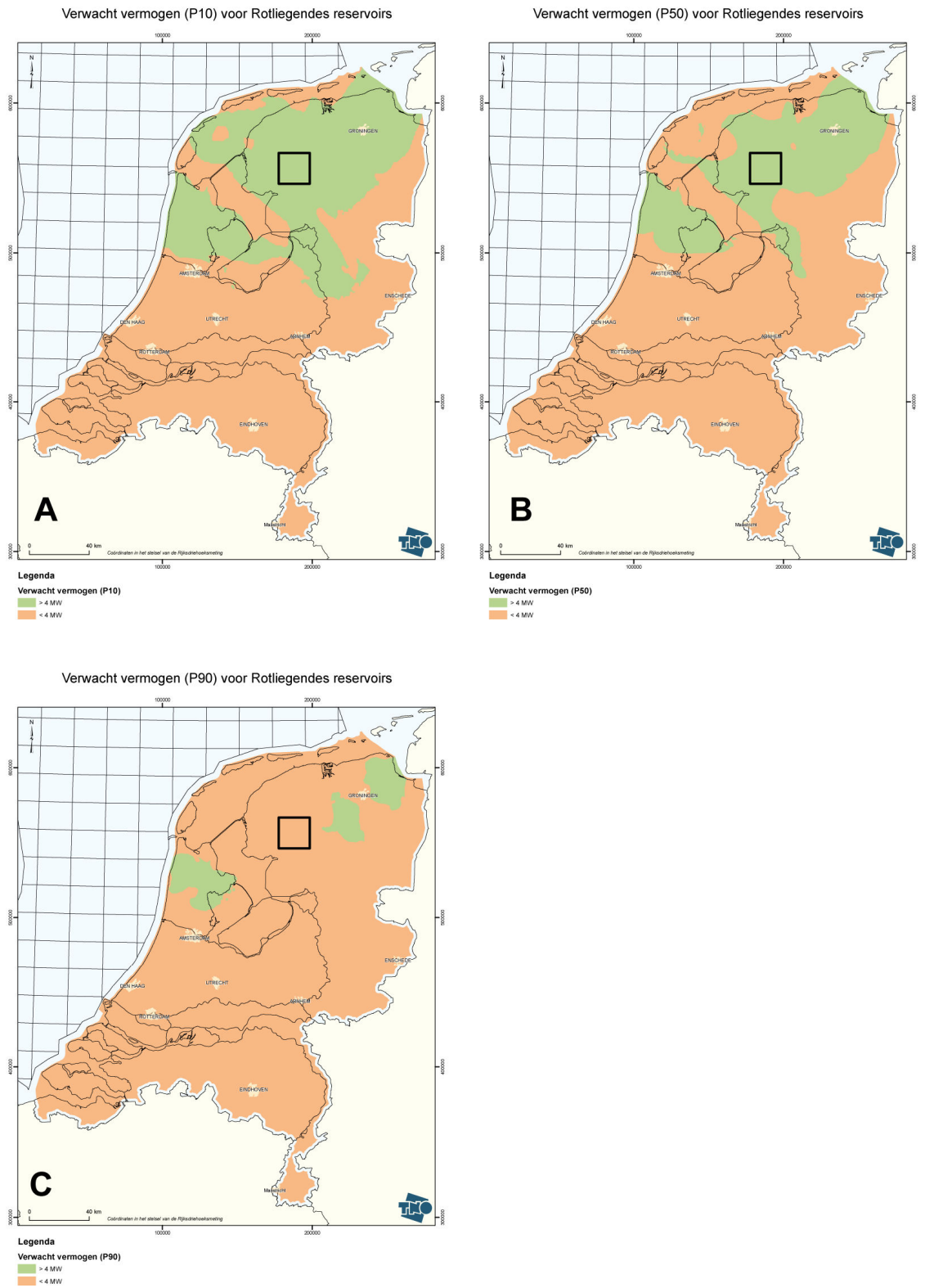
Voor het maken van de geothermische vermogenskaarten is per aquifer het geothermische vermogen bij P10, P50 en P90 berekend met de aanname dat de Coëfficiënt Of Performance (COP) 15 bedraagt. Figuur 3 toont de geothermische vermogenkaarten. De tweedeling is gemaakt bij een grenswaarde in het vermogen van 4 MW. Voor een gedetailleerde uitleg zie Appendix C.

## *4. Onzekerheid in geothermisch vermogen (zeker/onzeker)*

Onzekerheid in dikte, diepte, porositeit en permeabiliteit is inherent aan de evaluatie van ondergrondse aquifers. Voor de berekening van het geothermische vermogen is daarom rekening gehouden met de relatieve onzekerheid. De onzekerheid van het geothermische vermogen tussen P90 en P50 op een locatie is berekend met de formule  $(P50 - P90)/P50$ . In essentie is dit een maat van de helling van de curve zoals weergegeven in Figuur 1. Deze helling wordt vooral bepaald door de onzekerheid in de transmissiviteit. Voor een gedetailleerde uitleg zie Appendix C.



Figuur 2. Expertkaarten voor de Slochteren Formatie: (A) aard van de ondergrond, (B) datadichtheid, (C) onzekerheid in geothermisch vermogen. In Appendix A, B en C zijn deze figuren uitvergroot en per aquifer weergegeven.



Figuur 3. Verwacht geothermisch vermogen kaarten bij een COP van 15 voor de Slochteren Formatie: (A) P10-vermogen gebieden, (B) P50-vermogen gebieden, (C) P90-vermogen gebieden.

## 2.1 Maatregelen gebiedenkaart

De zes bovengenoemde kaarten zijn sturend voor het maken van een maatregelen gebiedenkaart. Voor deze studie zijn aquifers gekarteerd uit het Perm (Slochteren Formatie), Trias en Krijt. Aquifers uit het Tertiair zijn niet meegenomen, omdat deze over het algemeen te ondiep liggen, waardoor deze een te lage watertemperatuur hebben.

Door de kaarten van een aquifer over elkaar heen te leggen ontstaat een onzekerheidsgebiedenkaart; een kaart met vakjes die elk een combinatie zijn van verschillende eigenschappen, die in de bovengenoemde punten 1 t/m 4 zijn behandeld (Figuur 4). Aan de gebieden zijn maatregelen gekoppeld, waardoor er een maatregelen gebiedenkaart ontstaat. Hierdoor is in één oogopslag te zien bij welke gebieden welke maatregelen gewenst zijn. Een overzicht van gebiedsdefinitie in termen van bovengenoemde eigenschappen is gegeven in Tabel 1.

Tabel 1. Overzicht van variabelen die leiden tot gebiedsdefiniëring en maatregelen. Het zwarte kader geeft een voorbeeld van hoe de informatie uit diverse kaarten gebruikt wordt om uiteindelijk tot een maatregel te komen.

Vermogenskaarten		Aquiferkarakterisatiekaart		Datadichtheidskaart	Onzekerheidsgebied	Maatregel
P10	P90-P50	Onzekerheid	Aard van de ondergrond	Datadichtheid	Gebiedsnummer	
Gebied zonder aardwarmte potentie => P10 < gewenst vermogen (4MW)	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0	Geen*
Gebied met aardwarmte potentie => P10 > gewenst vermogen (4MW)	P90 > gewenst vermogen & P50 > gewenst vermogen	Groot/onzeker	Grillig	Laag	1	1
				Hoog	2	Geen*
			Robuust	Laag	3	1
				Hoog	4	Geen*
		Klein/zeker	Grillig	Laag	5	Geen*
				Hoog	6	Geen*
			Robuust	Laag	7	Geen*
				Hoog	8	Geen*
	P90 < gewenst vermogen & P50 > gewenst vermogen	Groot/onzeker	Grillig	Laag	9	3,2
				Hoog	10	4 of 1
			Robuust	Laag	11	3
				Hoog	12	4 of 5
		Klein/zeker	Grillig	Laag	13	4, of 5 en 2
				Hoog	14	5 en 1
			Robuust	Laag	15	5 en 1
				Hoog	16	5
	P50 < gewenst vermogen & P10 > gewenst vermogen	Groot/onzeker	Grillig	Laag	17	3 en 1
				Hoog	18	Geen*
			Robuust	Laag	19	3 en 6
				Hoog	20	Geen*
		Klein/zeker	Grillig	Laag	21	3
				Hoog	22	4
			Robuust	Laag	23	Geen*
				Hoog	24	Geen*

\*: Geen maatregel voorzien voor het verkleinen van de spreiding P90-P50.



### 3 Maatregelen

Op basis van de aard van de ondergrond, de datadichtheid, het geothermische vermogen (P10, P50, P90) en de onzekerheid in het geothermische vermogen, zijn een twintigtal aardwarmte onzekerheidsgebieden gedefinieerd. Voor elk van deze gebieden is een maatregel of een combinatie van maatregelen voorgesteld.

Tabel 2. Overzicht maatregelen voor het verkleinen van de onzekerheid.

Nr.	Omschrijving maatregel	Van toepassing op gebied
1	Data-acquisitie in 1ste put	1,3,10,14,15,17,
2	Data-acquisitie in 1ste put en 2e put	9,13
3	Acquisitie seismiek	9,11,17,19,21
4	Reprocessing seismiek	4,12,13,22
5	Verlaging P90 criterium*	12,13,14,15,16
6	Zetten van een put	19
7	Voor verkleinen van spreiding P90-P50 is geen maatregel voorzien	0,2,4,5,6,7,8,18,20,23,24
nr.	Omschrijving algemene maatregel	
8	Mijnwettelijke gegevens die zich nog niet in het publieke domein bevinden vrijgeven	
9	Herbewerkingen van mijnwettelijke gegevens die niet in het publieke domein bevinden vrijgeven	
10	Maatschappij evaluaties die zich niet in het publieke domein bevinden vrij geven	

\*: stimuleringsmaatregel

De maatregelen die mogelijk tot een reductie in het verschil tussen P90 en P50 kunnen leiden (Tabel 2), doordat de curves zoals weergegeven in Figuur 1 steiler worden, zullen hieronder kort worden besproken:

#### *Maatregel 1 en 2: data acquisitie*

Onder deze maatregelen valt participatie in data-acquisitie. Hierbij gaat het om financiering van metingen tijdens of na de boring. Daarbij moet gedacht worden aan financiering van gamma-, neutron-, density- en soniclogmetingen en het nemen van kernmonsters. Deze metingen geven informatie over de opbouw en samenstelling van het gesteente, die zeer relevant is om eigenschappen, zoals dikte en porositeit van het gesteente in het gebied beter in kaart te brengen en de onzekerheid te verkleinen. Acquisitie in één of beide putten hangt af van de datadichtheid in het gebied en de aard van de aquifer.

#### *Maatregel 3: acquisitie seismiek*

Putten zijn slechts een puntwaarneming, met seismiek kan een groter gebied driedimensionaal in kaart worden gebracht. Acquisitie van seismiek kan de onzekerheid in de continuïteit en verbreiding van een aquifer verkleinen.

#### *Maatregel 4: reprocessing seismiek*

Reeds geschoten seismiek kan van slechte kwaliteit zijn, waardoor interpretatie bemoeilijkt wordt. Door nieuwe processing technieken en grotere reken capaciteit van computers kan de kwaliteit van seismiek worden verbeterd. Het voordeel is dat seismiek niet opnieuw geschoten hoeft te worden.

*Stimuleringsmaatregel 5: verlaging P90 criterium*

Er zijn gebieden of situaties denkbaar waar P90 niet gehaald wordt (grillig + hoge datadichtheid, robuust + lage/hoge datadichtheid; Tabel 1). In deze gebieden is het verlagen van het P90 criterium een mogelijke stimuleringsmaatregel.

*Maatregel 6: zetten van een put*

In een gebied waar de ondergrond robuust is, maar waar de onzekerheid rondom P90 en P50 door een te lage datadichtheid te groot is, is het zetten van een put aan te raden.

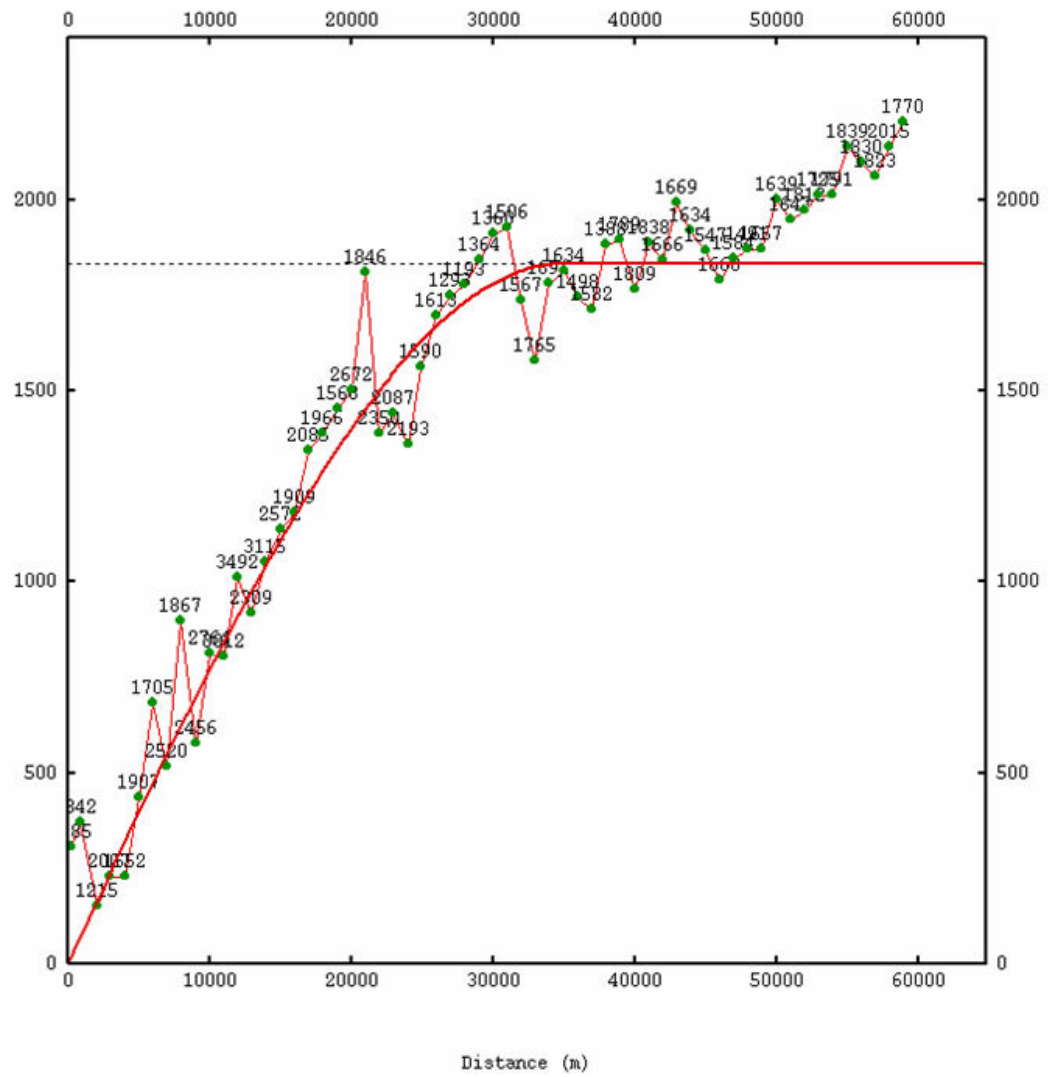
*Maatregel 7: geen maatregel voorzien*

Voor gebieden waar de potentie te laag is ( $P10 < 4$  MW) of waar voldoende gegevens beschikbaar zijn (onzekerheid laag) zijn geen maatregelen voorzien in het verkleinen van het verschil tussen P90 en P50. Dit wil niet zeggen dat geen subsidie of garantieregeling nodig is.

*Algemene maatregelen 8, 9 en 10: vrijgeven gegevens*

Dit zijn meer algemene maatregelen die genomen kunnen worden ter algehele stimulatie van exploratie naar aardwarmte. Het betreft al bestaande gegevens die nu nog niet openbaar zijn, maar wel additionele informatie kunnen geven over de eigenschappen van een aquifer.

Zodra één van bovenstaande maatregelen genomen wordt kan dat leiden tot een verkleining van het verschil tussen P90 en P50. De extra gegevens die een maatregel opleveren zullen effect hebben binnen een zekere reikwijdte vanaf het punt waar de maatregel genomen is. Hoe groot deze reikwijdte is, kan uit een variogram opgemaakt worden (zie voor gedetailleerde uitleg over variogrammen Appendix C). Uit de variogrammen die in deze studie gemaakt zijn voor de afzonderlijke aquiferparameters, blijkt dat de reikwijdte ligt tussen de 20-35 km (Figuur 4). Deze reikwijdte (range), is de maximale afstand tussen puntparen waarbinnen een puntwaarde nog een voorspellende waarde heeft. Daarnaast geeft de steilte van de curve aan hoe snel de onzekerheid toeneemt vanaf een punt, waarbij een steile curve aangeeft dat de onzekerheid snel toeneemt vanaf het punt gelegen in de oorsprong van de grafiek. Bij een reikwijdte van 30-35 km zoals in het voorbeeld is de voorspellende waarde minimaal. TNO gaat er vanuit dat de maximale voorspellende waarde van een maatregel binnen een straal van 10-15 km ligt.



Figuur 4. Een voorbeeld van een variogram met een reikwijdte (range) van ca. 35 km. De steile curve geeft aan dat de onzekerheid snel toeneemt vanaf het punt in de oorsprong (0,0).

## 4 Gebruik kaarten en tabellen

Door de aard van de ondergrond-, datadichtheids-, P10, P50 en P90 vermogens- en onzekerheidskaarten te combineren ontstaat er een onzekerheidsgebiedenkaart. Tabel 1 geeft een overzicht van de combinaties die leiden tot een gebiedsindeling en het advies of de maatregel die voor een gebied genomen kan worden. Figuur 4 geeft een illustratie over de werkwijze.

In deze paragraaf worden de resultaten en kaarten van de aquifers van de Slochteren Formatie gebruikt om het principe van de maatregelen gebiedenkaart nader uit te leggen. De maatregelen gebiedenkaart van de verschillende aquifers is het resultaat van de diverse combinaties die op basis van de zes basiskaarten kunnen worden gemaakt (Tabel 1). Op de onzekerheidsgebiedenkaarten (Figuur 6) zijn de nummers weergegeven die corresponderen met de maatregelen in Tabel 1. De maatregelen gebiedenkaarten (zie als voorbeeld Figuur 7) van alle aquifers zijn te vinden in Appendix E.

Ter illustratie is Noord Nederland als voorbeeld genomen om de kaart en het achterliggende proces uit te leggen. Stel dat in de regio (zwarte omkadering in figuren 2, 3, 6 en 7) een partij voornemens is een geothermisch project op te starten. Dan is uit de Figuren 2 en 3 achtereenvolgens op te maken dat in deze regio:

De aard van de ondergrond robuust is (Figuur 2A);

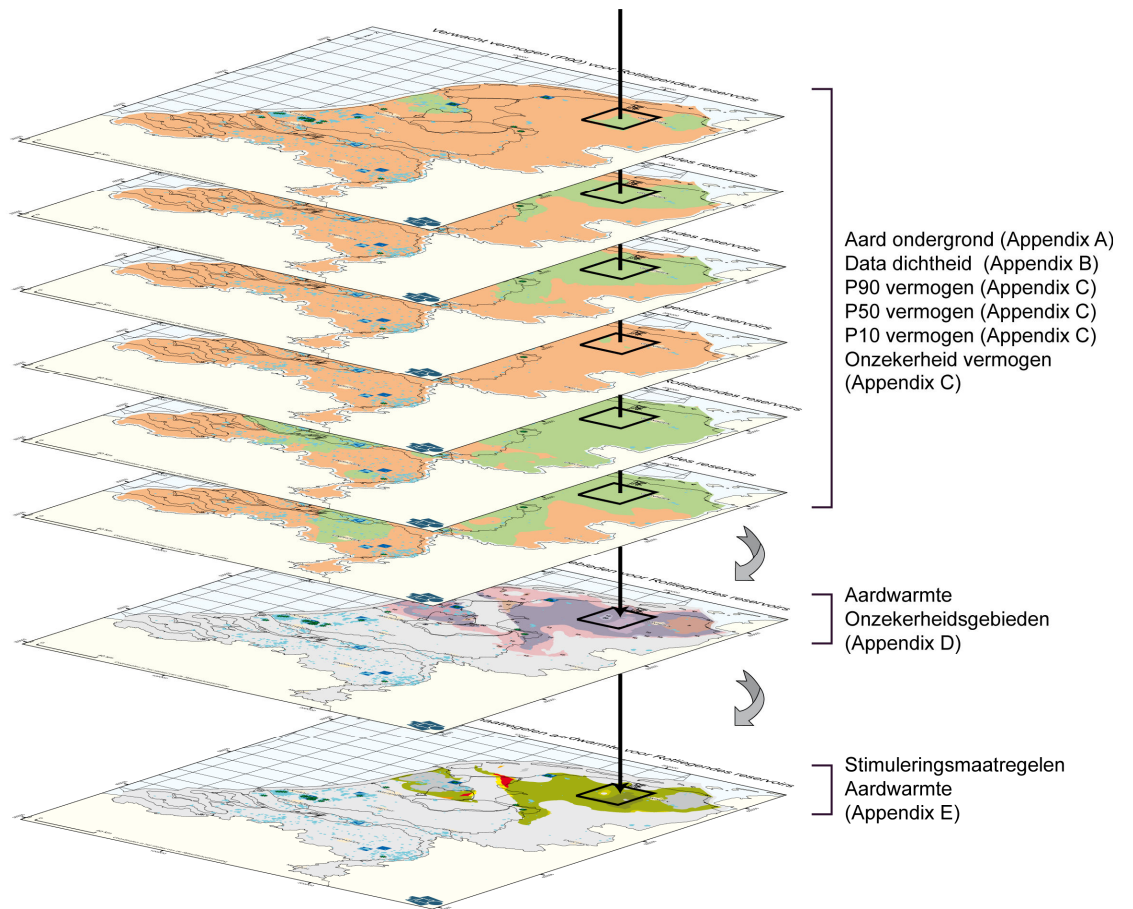
De datadichtheid hoog is (Figuur 2B);

De onzekerheid omtrent het geothermisch vermogen groot is (Figuur 2C);

Het P90-vermogen kleiner is dan het gewenste vermogen (4 MW) en het P50-vermogen groter is dan het gewenste vermogen (4 MW) (Figuren 3B & 3C).

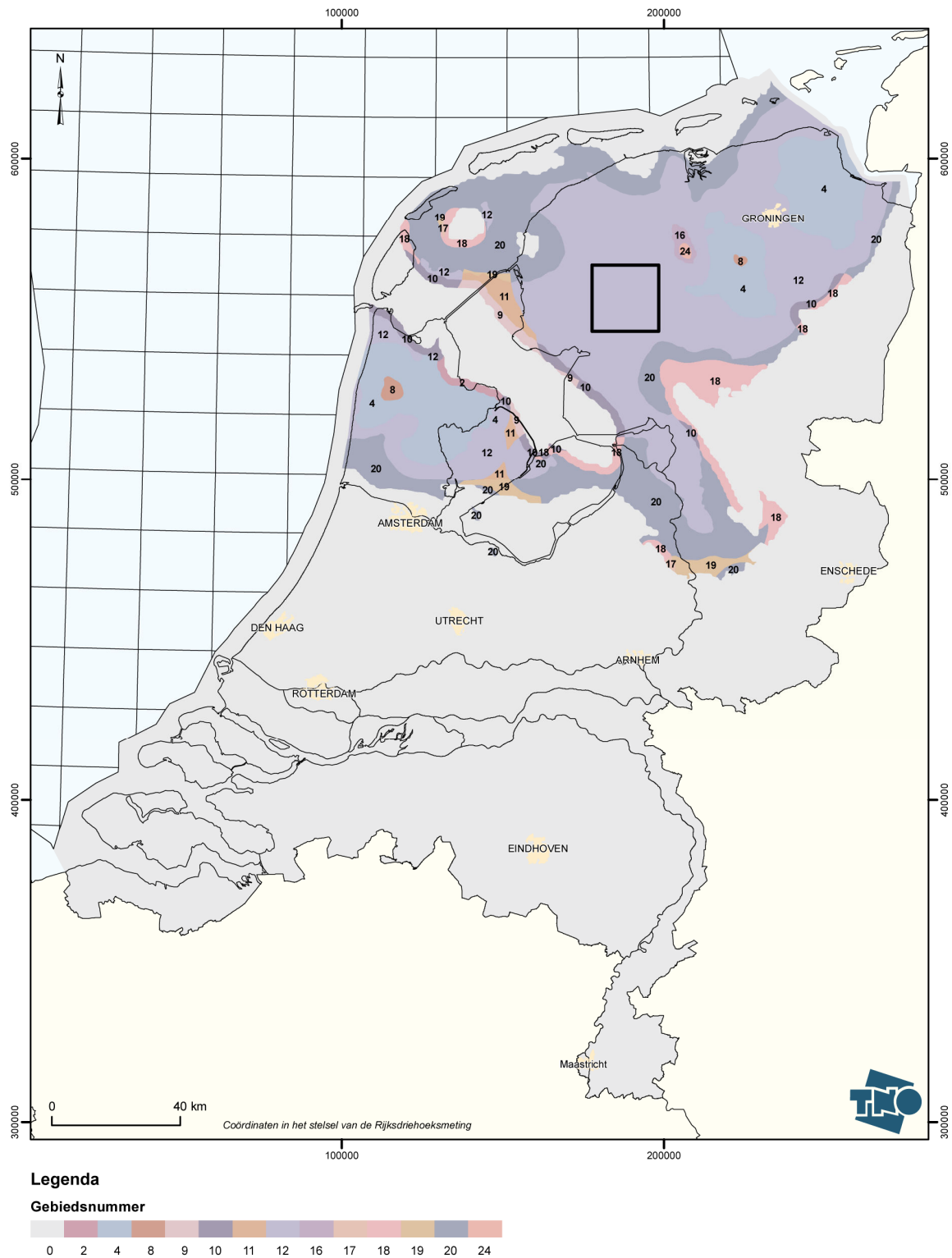
Dit komt overeen met gebiedsnummer 12 (Figuur 6). In Tabel 1 is hetzelfde proces zwart omlijnd weergegeven; het omlijnde traject leidt uiteindelijk tot maatregel 4 of 5; reprocessen seismiek of verlaging van P90. De keuze voor reprocessen van seismiek hangt af van de huidige kwaliteit.

Het is niet noodzakelijk voor elk aardwarmte exploratie initiatief de diverse kaarten en de tabel te doorlopen. De maatregelen gebiedenkaart (Figuur 7) en Tabel 1 laten namelijk in één oogopslag zien welke maatregel bij welk gebied hoort. Voor de grijze gebieden geldt dat voor de specifieke aquifer geen additionele maatregelen voorzien zijn. Dit komt enerzijds doordat die gebieden een hoge potentie hebben ( $P90 > 4$  MW), en anderzijds doordat ze ondermeer een zeer lage potentie hebben (zie Appendix E).



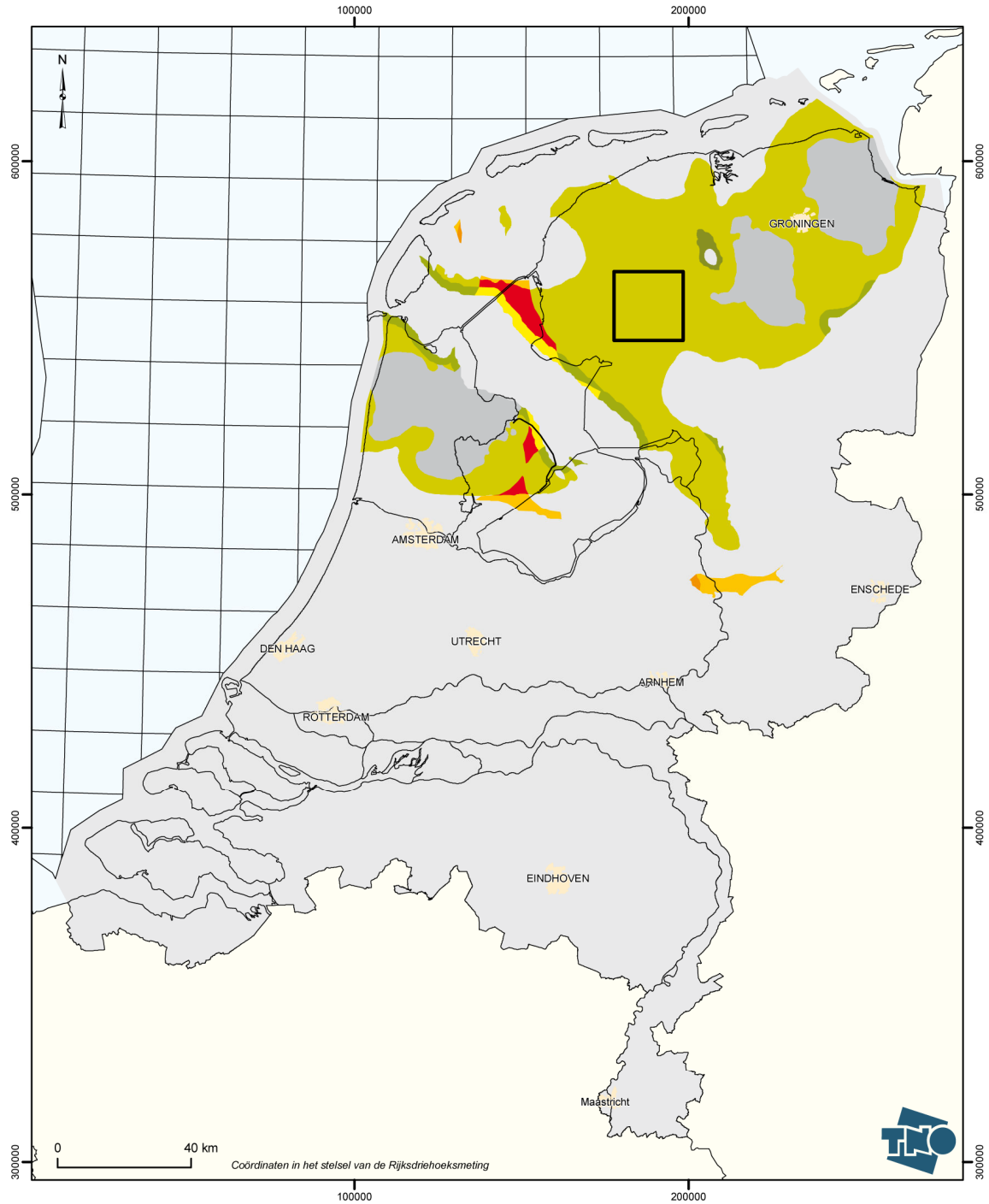
Figuur 5. Illustratie van hoe de afzonderlijke kaarten leiden tot een onzekerheidsgebieden kaart en maatregelen aardwarmte kaart per potentieel aquifer.

### Aardwarmte onzekerheidsgebieden voor Rotligendes reservoirs



Figuur 6. Aardwarmte onzekerheidsgebiedenkaart van Slochteren Formatie.

### Maatregelen aardwarmte voor Rotliegendes reservoirs



**Legenda**

**Maatregel**

- |   |   |
|---|---|
| <span style="color: red;">■</span> Acquisitie seismiek (3)                                  | <span style="color: yellow;">■</span> Reprocessing seismiek + Verlaging P90 criterium (4,5) |
| <span style="color: orange;">■</span> Acquisitie seismiek + Data acquisitie 1e put (3+1)    | <span style="color: green;">■</span> Reprocessing seismiek/Data acquisitie 1e put (4,1)     |
| <span style="color: yellow;">■</span> Acquisitie seismiek + Zetten put (3+6)                | <span style="color: grey;">■</span> Verlaging P90 criterium (5)                             |
| <span style="color: yellow;">■</span> Acquisitie seismiek/Data acquisitie 1e & 2e put (3,2) | <span style="color: lightgrey;">■</span> Geen maatregel voorzien; hoge potentie (7)         |
|   | <span style="color: lightgrey;">■</span> Geen maatregel voorzien; geen/lage potentie (7)    |

Figuur 7. Maatregelgebiedenkaart van de Slochteren Formatie.

## 5 Ondertekening

Utrecht, 18 maart 2010

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'B.M. Schroot', written over a horizontal line.

Drs. B.M. Schroot  
Afdelingshoofd



## A Maken van aard ondergrond kaart

In deze studie is op basis van lithostratigrafie en beoordeling van experts de aard van de ondergrond onderverdeeld in grillig en robuust. De ondergrond is geclassificeerd als grillig indien van een aquifer de aanwezigheid onzeker is of de aquifer met grote zekerheid niet aanwezig is. De aard van de ondergrond is robuust zodra er op basis van boringen voldoende zekerheid is over de aanwezigheid van een aquifer.

De onzekerheid over de aanwezigheid van een aquifer neemt naar de randen van de verbreidingsgebieden toe, omdat dunne gesteentepakketten een indicatie kunnen zijn van erosie of geringe primaire afzettingsdikte. Dit kan resulteren in relatief grotere diktevariaties. Voor het onderscheid tussen grillig en robuust is daarom een minimum dikte aangehouden van 20 m. Indien een pakket dikker is dan 20 m krijgt het de classificatie robuust. Wanneer het dunner is dan 20 m wordt het gedefinieerd als grillig. Aan de randen van de maximale verbreiding en langs structurele hogen (waar de aquifer is geërodeerd) is een bufferzone aangenomen van 3 km. Binnen deze zone is de aquifer eveneens als grillig geclassificeerd. Figuren A1 tot en met A3 geven de resultaten voor de aquifers weer.

De diktekaarten voor het Rotliegendes, Trias en Onder Krijt zijn gemaakt door middel van kriging van de dikte van lithostratigrafische zandsteen intervallen. Een uitzondering hierop vormt de Onder Krijt diktekaart van het West Nederlands Bekken. Hiervoor is gebruik gemaakt van de resultaten van een modelleringsstudie (rapport: TNO-034-UT-2009-02410). In die studie is uitgaande van gamma ray metingen per put een zand-klei verdeling gemaakt. Met behulp van een 3D interpolatie algoritme zijn 50 verschillende willekeurige modelrealisaties berekend. Van deze 50 realisaties is een netto zanddikte P50 verwachtingskaart gemaakt.

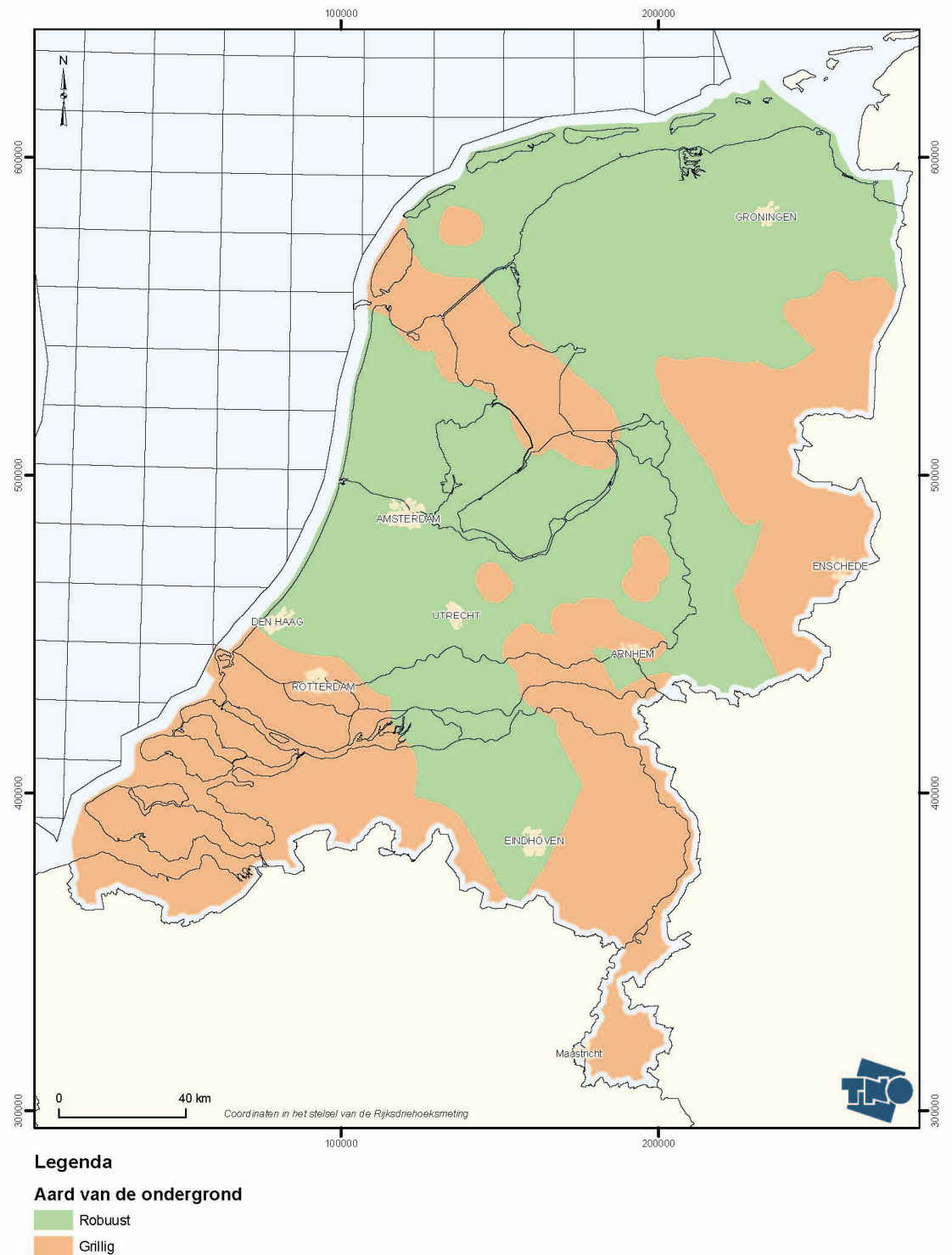
Het belangrijkste gevolg van de twee methoden voor het bepalen van de diktekaarten, is dat bij intervallen gedefinieerd op lithostratigrafie ook lagen voorkomen met een lage porositeit (silt, klei). Hierdoor wordt de gemiddelde porositeit van een interval lager geschat dan wanneer alleen met een puur zand interval wordt gerekend (bruto porositeit). Bij de gemodelleerde zanddikte van het West Nederlands Bekken is een meer gedetailleerde scheiding gemaakt tussen zand en silt/klei, waardoor de porositeit gemiddeld hoger is (netto porositeit).

Voor deze studie zijn de aquifers van de Slochteren Formatie, het Onder Trias en het Onder Krijt gekarteerd. Al deze aquifers hebben een vrijwel continue, regionale verbreiding. Door de regionale verbreiding is de onzekerheid over de aanwezigheid van deze aquifers doorgaans laag en dus is de aard van de ondergrond te bestempelen als robuust. De Onder Krijt aquifers in het West Nederlands Bekken worden als robuust beschouwd, omdat bij het doorboren van het gehele Rijnland Groep interval vrijwel altijd zandsteen aangeboord zal worden, zoals de resultaten van de bovengenoemde modelleringsstudie aantonen.

### Aantekening

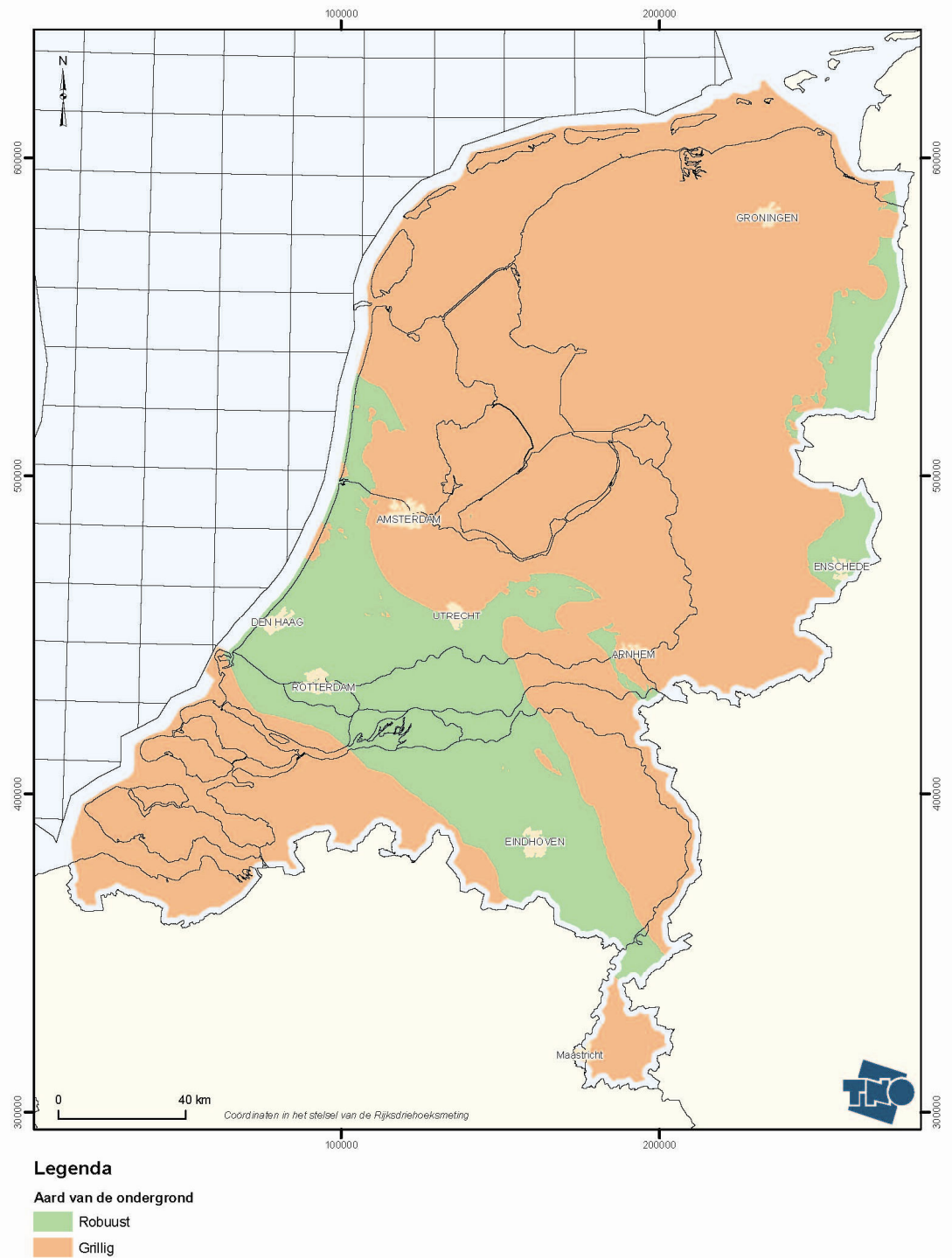
De sedimenten van de Schieland Groep in het West Nederlands Bekken worden in zijn geheel als grillig beschouwd. Omdat de meeste putten op structurele hogen zijn geboord, wordt verwacht dat eigenschappen, zoals dikte, porositeit en permeabiliteit niet representatief zijn voor de dikkere sedimentpakketten in laag gelegen delen. Mede door de lage datadichtheid en een niet representatieve verdeling van de datapunten, is de kartering van deze aquifers vooralsnog niet uitgevoerd.

## Aard van de ondergrond voor Rotligendes reservoirs



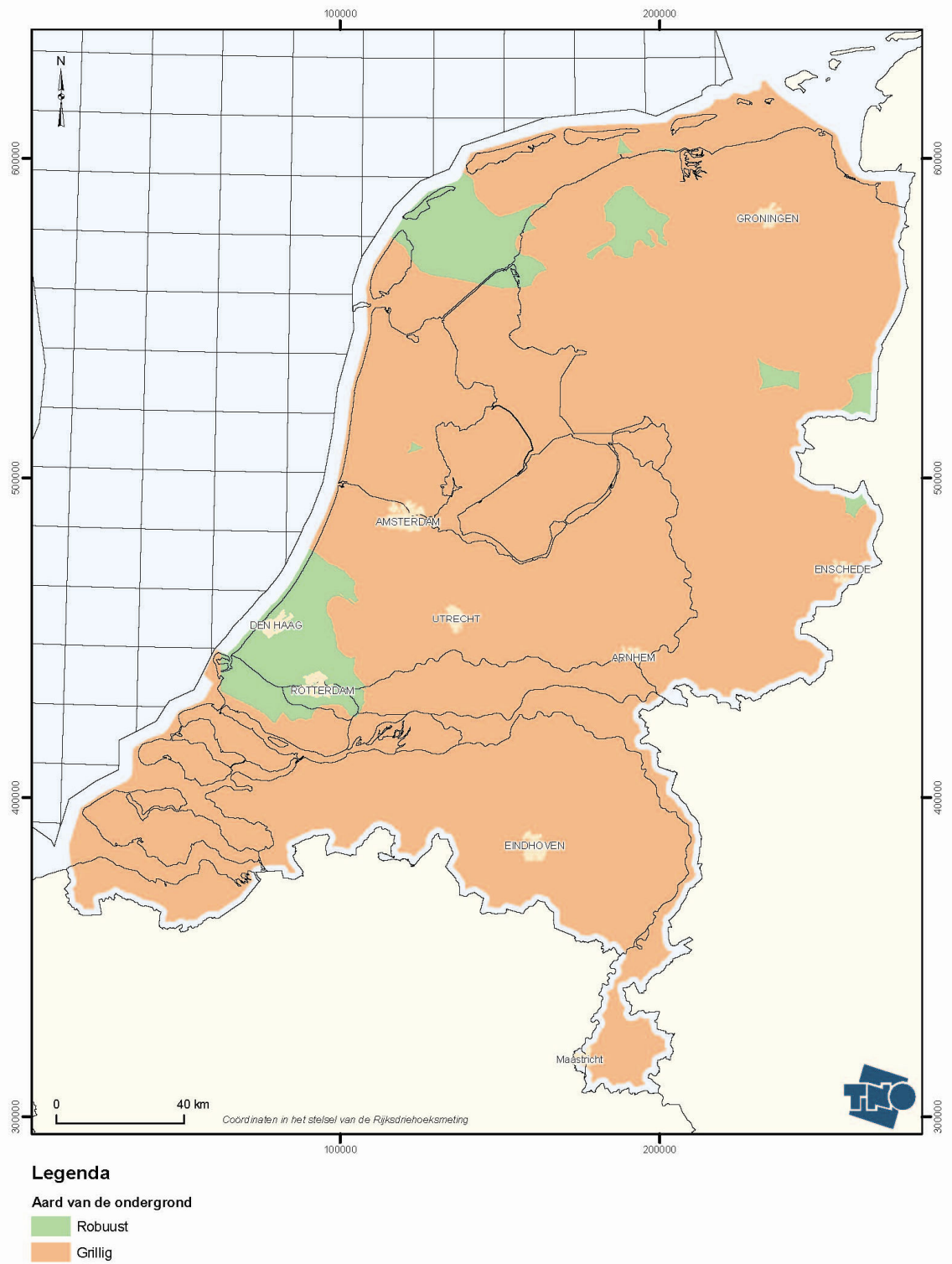
Figuur A1. Aard van de ondergrond voor de Slochteren Formatie.

### Aard van de ondergrond voor Trias reservoirs



Figuur A2. Aard van de ondergrond voor de Trias reservoirs.

### Aard van de ondergrond voor Onder Krijt reservoirs



Figuur A3. Aard van de ondergrond voor de Onder-Krijt reservoirs.

## B Maken van datadichtheidskaart

Voor de geologische kartering van aquifers zijn drie datatypen beschikbaar, in volgorde van belangrijkheid zijn dit:

Boorgatmetingen (putten): tijdens het boren worden meerdere metingen uitgevoerd. Soms worden ook kernen (gesteentemonsters) genomen. Deze metingen geven gedetailleerd en accuraat inzicht in de kwaliteit van het gesteente;

3D seismiek: 3D seismiek is een opname techniek waarbij een dicht driedimensionaal grid van seismische datapunten ontstaat waarmee een relatief gedetailleerd beeld van de ondergrond verkregen kan worden.

2D seismiek: 2D seismiek is een opname techniek, die resulteert in één verticaal vlak met seismische datapunten. Het beeld van de ondergrond is derhalve aanzienlijk minder compleet dan bij 3D seismiek.

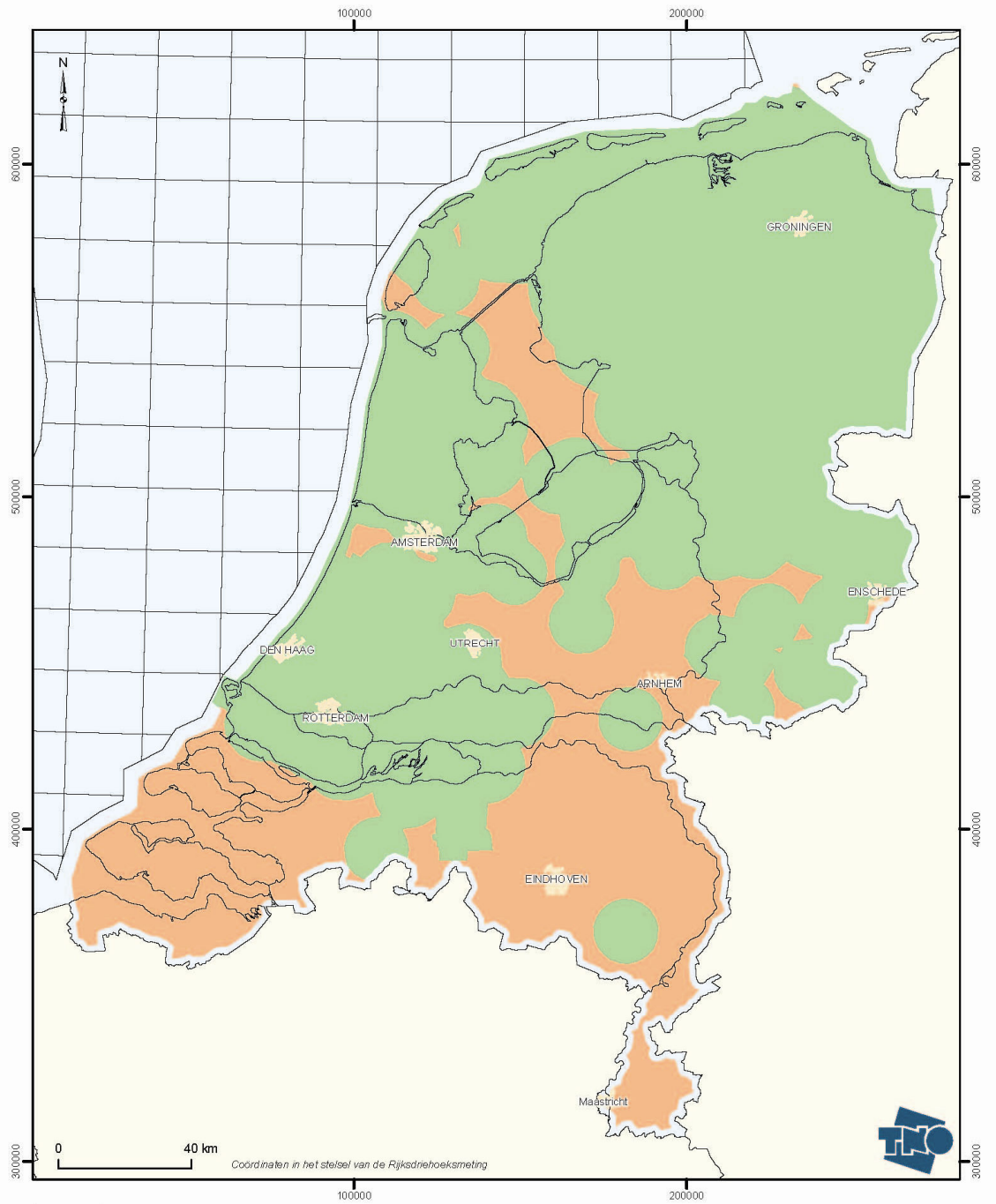
Per aquifer is voor elk datatype de datadichtheid bepaald. Voor boorgatmetingen is de datadichtheidkaart in aantal boringen per km<sup>2</sup> bepaald, bij een zoekstraal van 10 km.

Voor de inventarisatie van 3D seismiek is generiek te werk gegaan; daar waar 3D seismiek aanwezig is, is de waarde 1 toegekend, daar waar het niet aanwezig is de waarde 0.

Voor 2D seismiek is de lijndichtheid bepaald. Hiervoor zijn zowel de onshore als offshore 2D lijnen in de inventarisatie meegenomen. Hiermee wordt voorkomen dat het aantal lijnen langs de kust wordt onderschat. De datadichtheid is bepaald in aantal lijnen per km<sup>2</sup> bij een zoekstraal van 15 km.

Voor het verkrijgen van de totale datadichtheid zijn bovengenoemde kaarten samengevoegd. Daarbij is een wegingsfactor per kaart toegekend. De wegingsfactoren zijn voor boorgatmetingen, 3D en 2D seismiek respectievelijk: 1000, 10 en 1 (gewicht putten > gewicht 3D >> gewicht 2D). Deze wegingsfactoren zijn bepaald om een verhouding te krijgen naar belangrijkheid. Boorgatmetingen worden hierbij als belangrijkste gegeven beschouwd. De grenswaarde die zorgt voor de hoog/laag verdeling is een “expert beoordeling” die per aquifer is gemaakt. De resultaten per aquifer worden weergegeven in Figuren B1 tot en met B3.

Data dichtheid (putten, 3D/2D seismiek) voor Rotliegendes reservoirs

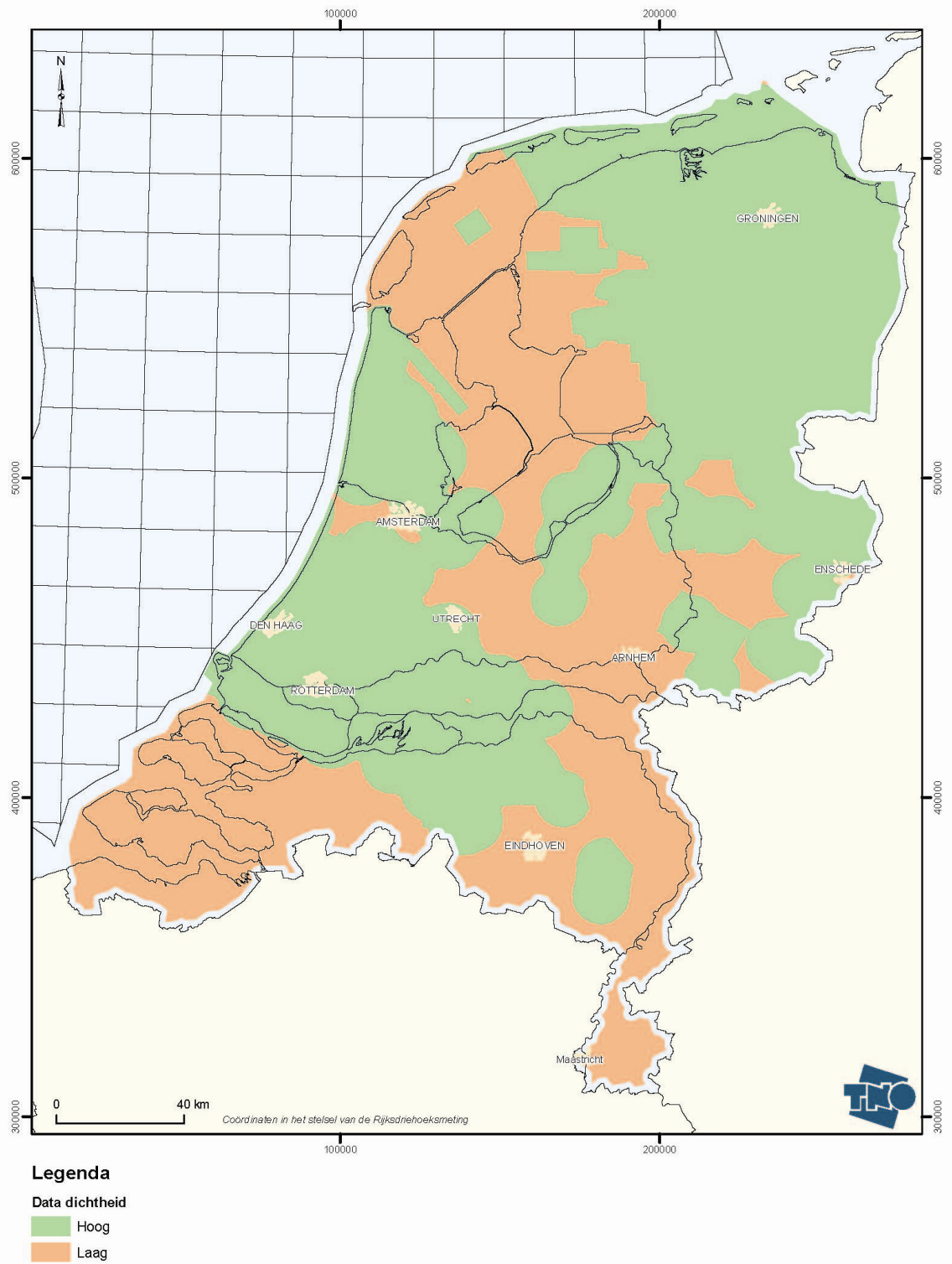


- Legenda**
- Data dichtheid**
- Hoog
  - Laag

Figuur B1. Datadichtheid van putten, 3D en 2D seismiek voor de Slochteren Formatie.

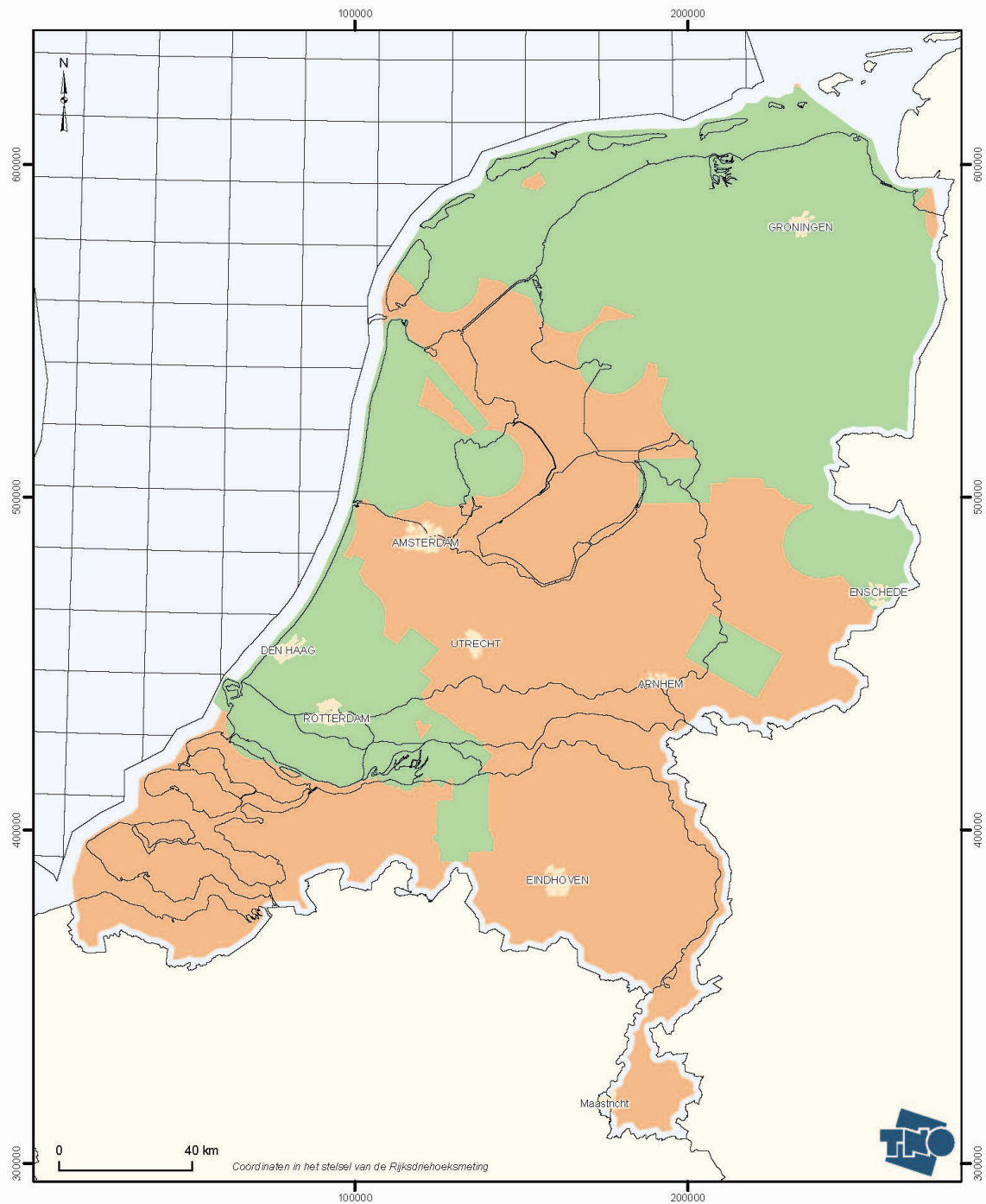


### Data dichtheid (putten, 3D/2D seismiek) voor Trias reservoirs



Figuur B2. Datadichtheid van putten, 3D en 2D seismiek voor de Trias reservoirs.

### Data dichtheid (putten, 3D/2D seismiek) voor Onder Krijt reservoirs



**Legenda**

- Data dichtheid
- Hoog
  - Laag

Figuur B3. Datadichtheid van putten, 3D en 2D seismiek voor de Onder-Krijt reservoirs.

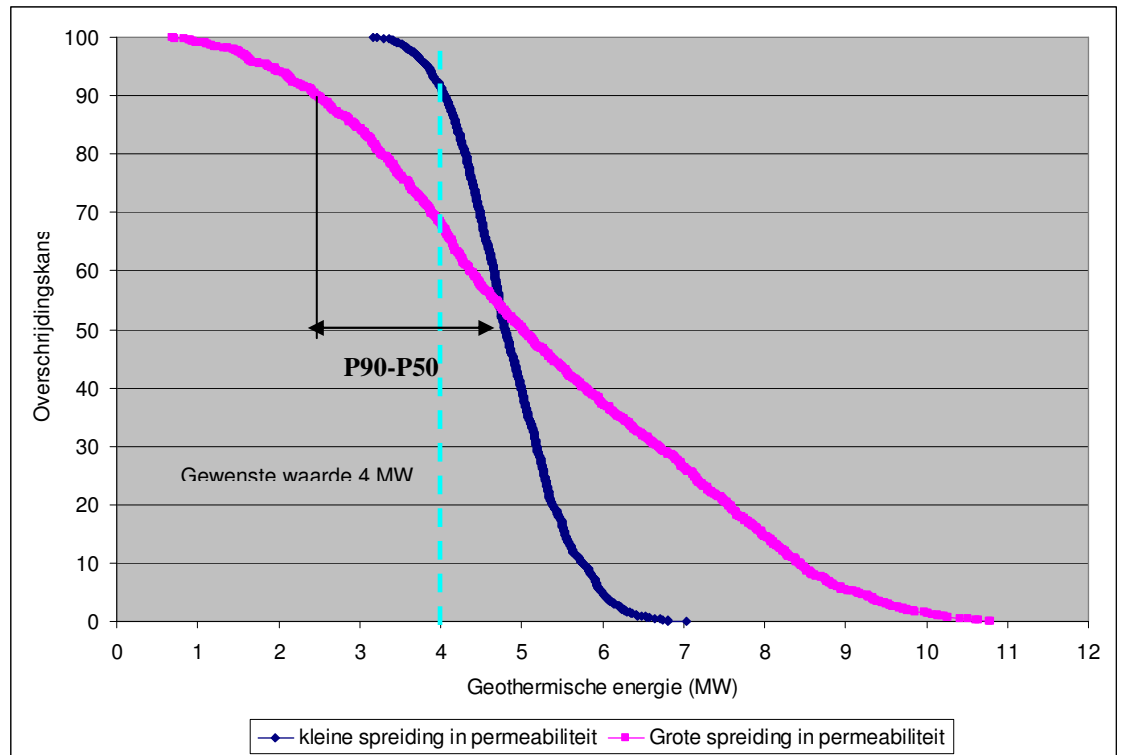


## C Geothermisch vermogenskaart

In deze sectie wordt methodologisch en inhoudelijk uiteengezet welke bronnen van onzekerheid van invloed zijn op het geothermische vermogen en vervolgens hoe deze onzekerheden zijn gemodelleerd. De Figuren C8 tot en met C19 geven de resultaten per aquifer.

### C.1 Geothermische vermogenskaart

Uitgangspunt van dit onderzoek is om maatregelen voor te stellen voor gebieden waar het geothermische vermogen bij P90 lager en bij P50 boven het gewenste geothermische vermogen uitkomt. In essentie zijn er twee (eind-) situaties denkbaar, zoals weergegeven in Figuur C1. Een grote spreiding in geothermisch vermogen, of een grote onzekerheid, resulteert in de vlakke paarse curve. Een kleine spreiding, en dus een kleine onzekerheid, in het geothermisch vermogen leidt tot een steile curve (blauwe curve).



Figuur C1. Geothermisch vermogen grafiek uit DoubletCalc. Er zijn twee scenario's gepresenteerd. Op de permeabiliteit na zijn alle parameters identiek. Dit illustreert de gevoeligheid voor het verschil tussen de P90 en P50 vermogen ten gevolge van de onzekerheid in de evaluatie van de ondergrond.

Voor deze studie is besloten om met variabele pompdruk te gaan rekenen, omdat het geothermische vermogen bijna lineair stijgt met het verhogen van de pompdruk. Er zit echter een limiet aan het opvoeren van de pompdruk. Enerzijds kan een te hoge pompdruk de aquifer onherstelbaar beschadigen en anderzijds wordt de levensduur van de warmteproductie door een hoge pompdruk verkort. Figuur C2 maakt duidelijk wat de relatie is tussen COP, pomp vermogen en geothermisch vermogen.

Er wordt voorgesteld om het geothermische vermogen te berekenen bij een COP van 15 en een maximale druk op 2/3 van de hydrostatische druk op aquifer niveau. Bij een COP van 15

levert de inzet van 1 MW aan energie (voor bijvoorbeeld het pompvermogen) 15 MW op. De keuze van  $COP > 15$  is arbitrair. COP kan als een duurzaamheidsindicator worden gezien. Daarnaast heeft de COP invloed op de terugverdientijd van de investering. Hoe hoger de COP hoe korter de terugverdientijd van de investering. Uit de aanvragen voor opsporingsvergunningen aardwarmte valt op te maken dat de aanvragers over het algemeen streven naar een COP van minimaal 15.



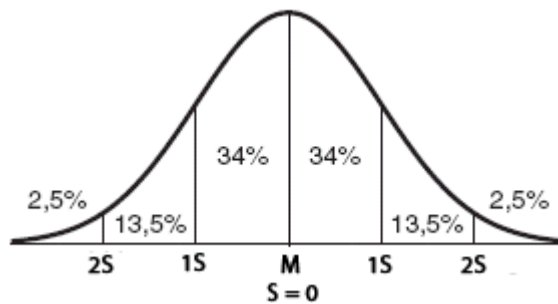
Figuur C2. Voorbeeld van vermogensgrafiek uit DoubletCalc. Op basis van aquiferparameters berekend Doubletcalc het pompvermogen, het debiet (pomp volume flow), benodigd geothermisch vermogen en het rendement (COP) bij toenemende pompdrukverschil. Het gaat hierbij om het verschil in pompdruk tussen de injectie en productieput. Het rendement (COP) daalt zodra meer pompvermogen gebruikt moet worden om een gewenst debiet en daaraan gerelateerd geothermisch vermogen te berekenen.

Het doel van deze studie is om per aquifer een maatregelen gebiedenkaart te maken die een overzicht geeft van maatregelen die voor een bepaald gebied genomen kunnen worden. Het berekenen van het vermogen gaat op basis van de transmissiviteit. De transmissiviteit is het mathematische product van permeabiliteit en dikte van een aquifer. Het is daarom belangrijk vooral de verwachtingswaarde en onzekerheid van dikte en permeabiliteit vast te stellen. Voor het vermogen is eveneens de temperatuur van belang. In deze studie is aangenomen dat de temperatuur met  $31^{\circ}\text{C}$  per kilometer stijgt.

Bij de evaluatie van de ondergrond wordt de onzekerheid gekwantificeerd door het geven van een spreiding waarbinnen de te verwachten waarde van de parameter zich naar alle waarschijnlijkheid zal bevinden. Figuur C3 geeft aan hoe een dergelijke verdeling eruit kan zien. Op de X-as is de parameter waarde tegen de frequentie uitgezet (Y-as). De waarde 'M' is de verwachtingswaarde, 'S' is de standaard deviatie, genormaliseerd naar 1. De percentages in de grafiek geven aan hoeveel van de parameterwaarden zich binnen één, twee of drie maal de standaard deviatie bevinden. Dit geldt voor normale verdelingen. In DoubletCalc wordt de verdeling benaderd door de dubbele driehoekmethode te gebruiken op de ingevoerde hoge, lage en verwachtingswaarde. De ervaring leert dat voor vier parameters in DoubletCalc (bruto en netto dikte, diepte, porositeit) de spreiding goed te bepalen is en dat er redelijke overeenstemming over het bepalen hiervan bestaat tussen de diverse marktpelers. Er is echter geen eenduidige methode voor het bepalen van de permeabiliteit.

Het is in de aardwetenschappen algemeen bekend dat de inschatting van de aquifer permeabiliteit een zeer lastige kwestie is. Afhankelijk van de beschikbare data en het type

aquifer zijn bepaalde methoden adequaat. Onzekerheid en spreiding in de schatting van deze parameter zijn voornamelijk gerelateerd aan de hoeveelheid beschikbare data en kennis van de aard van de aquifer. Het is gebleken dat de bepaling van de aquifer permeabiliteit door de verschillende consultants op verschillende manieren wordt bepaald, waarbij niet altijd de optimale keuze qua data en methodiek wordt gemaakt (referentie: aanvragen opsporingsvergunning). Dit heeft tot gevolg dat de opgegeven waarden vaak geen goede benadering zijn voor de te verwachten permeabiliteit en dat daardoor de spreiding in de permeabiliteit te groot is. In de geactualiseerde versie van het TNO advies rapport TNO-034-UT-2010-00473/A “Voorstel rapportage-vereisten geologische evaluatie aardwarmte project.” (zie <http://www.nlog.nl/nl/home/geothermy.html>) is een procedure beschreven waaraan minimaal voldaan moet worden en waarbij, naar inzicht van TNO, op adequate wijze een eerste orde schatting van de permeabiliteit in een bestaande put bepaald kan worden (zie paragraaf 2.1.3.2 Permeabiliteit). Bepaling van de permeabiliteit volgens deze richtlijn zou tot meer eenduidige waarden en spreiding en bovendien tot meer consistentie tussen de evaluaties van verschillende consultants moeten leiden. Dit hoeft overigens niet noodzakelijkerwijs tot een kleinere spreiding te leiden.



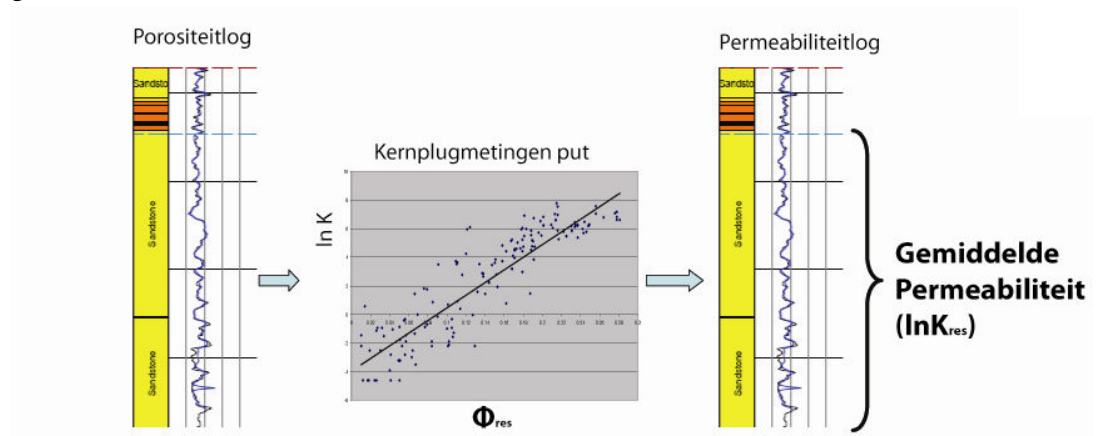
Figuur C3. Voorbeeld van een normale verdeling van een aquiferparameter. 1S = 1x standaard deviatie, 68% van alle waarden vallen in dit bereik; 2S = 2x de standaard deviatie, 95% van alle waarden vallen in dit bereik

Door lokale en regionale variaties in de ondergrond neemt de onzekerheid voor deze parameters toe met de afstand tot bekende puntwaardes die bepaald zijn in putten toe. Dit werkt ook door in het berekenen van de transmissiviteit en dus uiteindelijk in de onzekerheid van de vermogenskaarten. Het definiëren van de transmissiviteit en het vermogen is daarom geen gemakkelijke opgave. Een hoge onzekerheid in de transmissiviteit leidt tot een grote onzekerheid in het geothermische vermogen. Voor het bepalen van de P90, P50 en P10 vermogenskaarten moet de onzekerheid voor de hele aquifer in termen van P90, P50 en P10 van zowel permeabiliteit als dikte tussen de diverse putten gekarteerd worden. De werkwijze hiervoor wordt hieronder uiteengezet.

## C.2 Berekenen van de dikte, porositeit en permeabiliteit van de aquifer in een put

Dikte, porositeit en permeabiliteit zijn te bepalen uit putgegevens. Bij het boren vinden metingen plaats, die meerdere logs opleveren. Aan de hand van deze logs zijn verschillen in lithologie (soort gesteente) te bepalen. Hierdoor is per aquifer de dikte van een gesteentepakket op de locatie van een put te achterhalen. Met behulp van de logs is de permeabiliteit te berekenen. Daarvoor dient eerst de porositeit over een bepaald loginterval te worden berekend. Porositeit is direct te berekenen uit de logmetingen, resulterend in een zogenaamde porositeitslog, die de variatie van porositeit in de aquifer weergeeft.

Uit de porositeitslog wordt de permeabiliteit berekend aan de hand van de porositeit-permeabiliteits relatie (Figuur C4). Deze relatie is gebaseerd op plugmetingen uit een gesteentekern



Figuur C4. Voorbeeld van een lineaire relatie tussen porositeit en de natuurlijke logaritme ( $\ln K$ ) van de permeabiliteit op basis van kernplugmetingen.

Voor het berekenen van porositeit en permeabiliteit zijn voor elke potentiële aquifer de putten geselecteerd die de aquifer hebben aangeboord en waarvan digitale loggegevens beschikbaar zijn. De selectie van putten en berekening van de porositeit zijn geautomatiseerd, zodat de porositeit per aquifer voor alle putten in bulk kan worden berekend. De resultaten (porositeitslogs) zijn gecontroleerd met beschikbare kernplugmetingen. Uit deze controle bleek dat de porositeitslogs op basis van de neutron- en/of densitylog het minst afwaken van de gemeten porositeit uit kernmetingen. Alleen de resultaten op basis van deze logs zijn uiteindelijk gebruikt voor het karteren van de porositeit.

Voor het loginterval dat de aquifer representeert is vervolgens per put de gemiddelde porositeit ( $\Phi_{res}$ ) uitgerekend, en voor de putten waarvan kernplugmetingen beschikbaar zijn is de gemiddelde permeabiliteit ( $\ln K_{res}$ ) bepaald conform de lineaire porositeits-permeabiliteits relatie in die put.

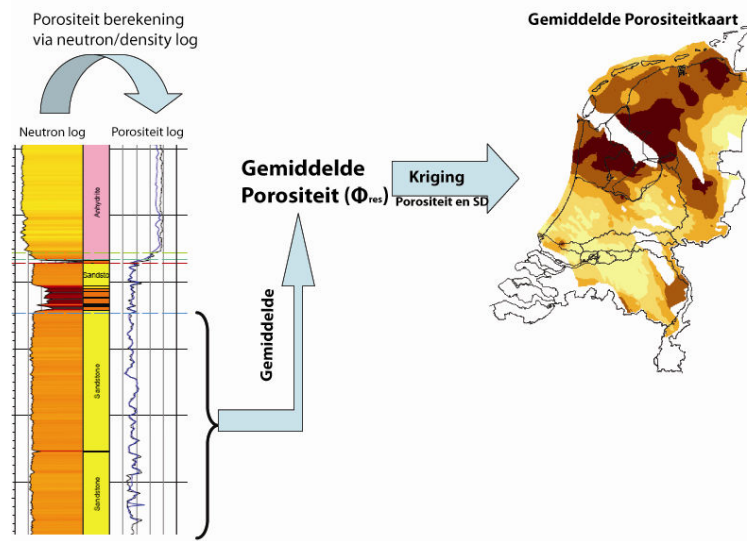
### C.3 Landsdekkende kaarten van dikte, porositeit, permeabiliteit en transmissiviteit

#### Dikte

De diktekaarten worden geïnterpoleerd met kriging uit de puntgegevens van de putten en gecorrigeerd met geometrische randvoorwaarden uit het 3D model van de Nederlandse ondergrond.

#### Porositeit en permeabiliteit

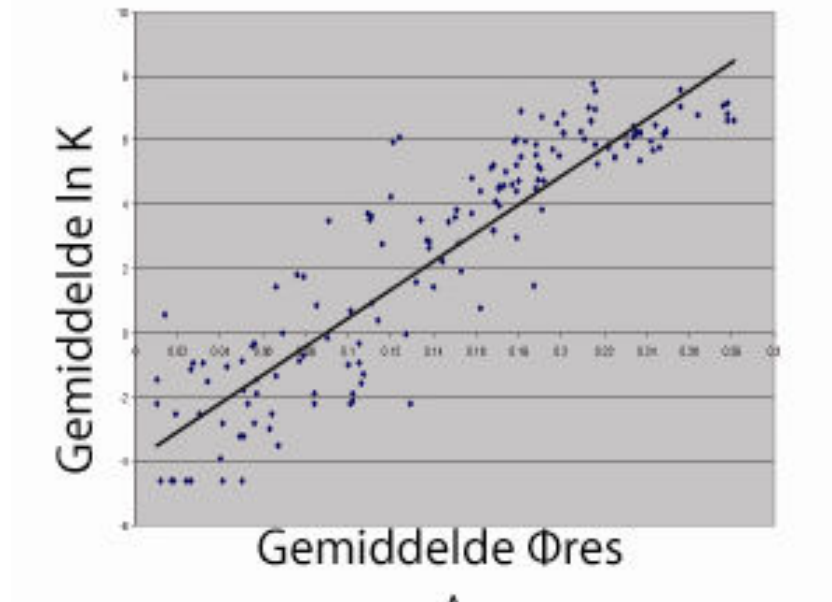
De permeabiliteitskaarten worden niet rechtstreeks geïnterpoleerd uit de puntwaarden van gemiddelde  $\ln K_{res}$ , omdat anders niet alle porositeitsinformatie wordt meegenomen wanneer putten geen kernmetingen hebben. Om deze metingen wel mee te nemen worden in een eerste stap porositeitswaarden geïnterpoleerd uit de puntwaarden met behulp van kriging, (Figuur C5) en vervolgens worden deze gebruikt om de gemiddelde permeabiliteit ( $\ln K_{res}$ ) te berekenen.



Figuur C5. Kriging van porositeitswaarden uit puntgegevens in de putten. Hierbij is gebruik gemaakt van cokriging, waarbij diepte als extra informatie is gebruikt. Dit resulteert in een spatiële correctie van porositeit afhankelijk van diepte.

In een volgende stap wordt de porositeitskaart omgerekend naar gemiddelde permeabiliteit. Voor deze conversie wordt een lineaire relatie gebruikt tussen gemiddelde porositeit ( $\Phi_{res}$ ) en gemiddelde permeabiliteit ( $\ln K_{res}$ ) uit de putten met kernmetingen (Figuur C6).

$$(\ln K_{res})_{x,y} = A + B (\Phi_{res})_{x,y} \quad (\text{eq. C1})$$



Figuur C6. Gemiddelde reservoirporositeit uitgezet tegen gemiddelde reservoir permeabiliteit voor putten waar kernplugmetingen beschikbaar zijn. De plot wordt gekenmerkt door een lineaire relatie.

Randvoorwaarde is dat op de locaties van putten waar kernplugmetingen beschikbaar zijn de berekende  $(\ln Kres)_{x,y}$  overeenkomt met de  $(\ln Kres)$  van de put. Bovendien bevat de relatie in Figuur C6 gebiedsafhankelijke afwijkingen van de landelijke trend, die van belang zijn om mee te wegen in de interpolatie. Om aan deze twee doelstellingen te voldoen wordt de berekende  $(\ln Kres)_{x,y}$  gecorrigeerd met een interpolatie in kaartbeeld van de afwijkingen van  $(\ln Kres)$  in de putten ten opzichte van de trendlijn in Figuur C6:

$$(\ln Kres)_{x,y} = A + B (\Phi res)_{x,y} + C_{x,y} \quad (\text{eq. C2})$$

Waarbij  $C_{x,y}$  de waarde is van de correctie.

#### Inschatting van onzekerheden

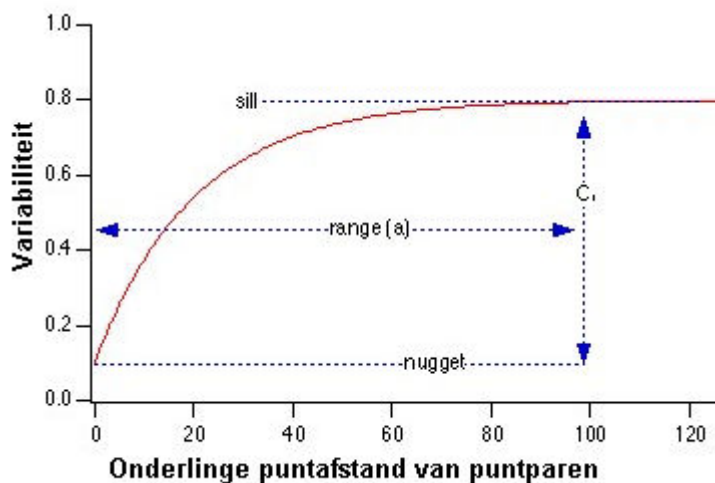
Het interpoleren in kaartbeeld van  $(\Phi res)_{x,y}$  en  $C_{x,y}$  en de bijbehorende onzekerheid is gebeurd door gebruik te maken van de interpolatietechniek kriging. Voordat het werkelijke bepalen van de ruimtelijke verbreiding middels kriging wordt uitgevoerd, zijn de gegevens geanalyseerd met behulp van een variogram (Figuur C7). In het variogram wordt de variantie van puntparen (putgegevens) uitgezet tegen de afstand tussen de punten van dat puntpaar.

Er zijn drie termen die van belang zijn bij een variogram:

Nugget: de onzekerheid van de waarde op de meetlocatie, ofwel de ruis op een punt;

Sill: de variabiliteitswaarde, waarbij de variabiliteit stabiel blijft met groter wordende afstand;

Range: de afstand waarop geen verandering meer optreedt in de variabiliteit.



Figuur C7. Terminologie van een variogram. Een variogram wordt bepaald op basis van puntparen en vormt de basis voor de kriging interpolatie methode.

In termen van onzekerheid in de evaluatie van de ondergrond, zijn nugget en range belangrijke parameters. De nugget is een waarde voor de onzekerheid van en rondom de puntmeting door bijvoorbeeld een zeer grillige ondergrond, de meetfout en evaluatie/interpretatie verschillen. De range is de afstand tussen puntparen waarbinnen een puntwaarde nog een bepaalde voorspellende waarde heeft. De sill is een maat voor de maximale variatie.

De nugget, sill en range van  $(\Phi_{res})_{x,y}$  en  $C_{x,y}$  zijn bepaald uit de variogrammen van de putgegevens van  $\Phi_{res}$  en  $C$ , waarbij  $C$  de afwijking is van de gemiddelde put-permeabiliteit en de lineaire regressielijn.

$$C = (\ln K_{res}) - (A + B (\Phi_{res})) \quad (\text{eq. C3})$$

De kriging methodiek levert naast de verwachtingswaarde (P50) van dikte,  $(\ln K_{res})_{x,y}$  en  $(\Phi_{res})_{x,y}$  een standaarddeviatie op van deze waarden in kaartbeeld. De P50 en standaarddeviatie kaarten worden vervolgens gebruikt voor de berekening van P10 en P90 kaarten.

#### Transmissiviteit

De P90, P50 en P10 kaarten voor dikte en permeabiliteit zijn vervolgens gebruikt om de transmissiviteit te berekenen, uitgedrukt in Darcymeter (Dm). Hierbij is stochastisch op iedere locatie een distributie bepaald van het product van dikte en permeabiliteit, waaruit P90, P50 en P10 waarden zijn vastgesteld. Met behulp van deze transmissiviteitswaarden zijn P90, P50 en P10 vermogenskaarten gegenereerd met behulp van DoubletCalc (zie C1).

#### Onzekerheid in het geothermische vermogen

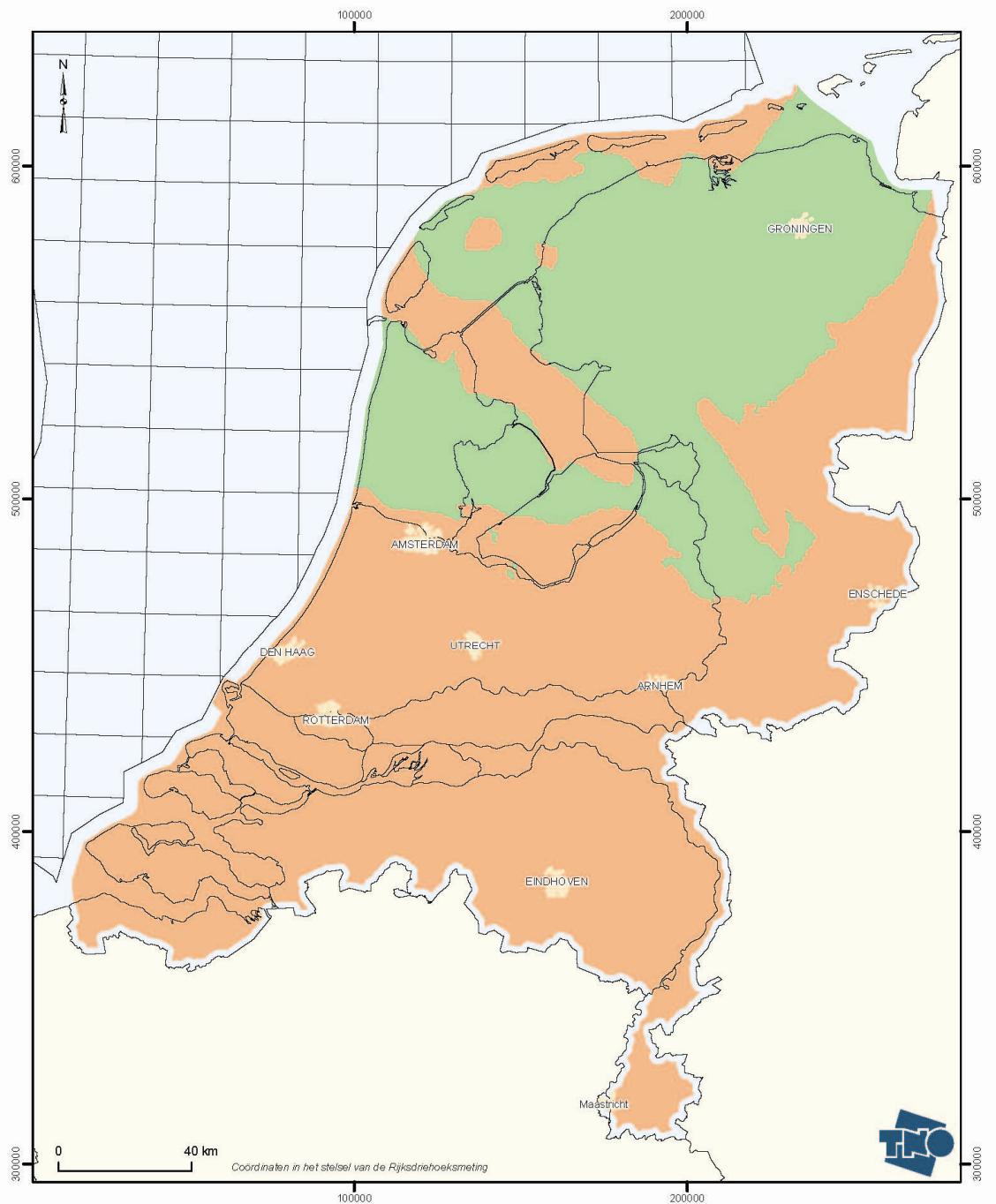
Zoals uit het bovenstaande blijkt, is er bij de bepaling van dikte, diepte, porositeit en permeabiliteit van aquifers sprake van een bepaalde mate van onzekerheid, die wordt gestuurd door de beschikbare hoeveelheid data en de aard van de ondergrond. Met deze onzekerheid is voor de berekening van het geothermische vermogen en de maatregelen rekening gehouden. De onzekerheid komt tot uiting in de steilheid van de helling van de curve in Figuur C1. Een grote onzekerheid in het geothermische vermogen, resulteert in de vlakke paarse curve. Een kleine onzekerheid in het geothermische vermogen leidt tot de steile blauwe curve.

Voor een kwantitatieve bepaling van de onzekerheid in het geothermische vermogen is gekozen om het verschil tussen het P50 en P90 vermogen te gebruiken, wat een maat is voor de steilheid van de curve en daarmee voor de onzekerheid. Om de curves onderling te kunnen vergelijken is een normalisatie nodig. Deze normalisatie is verkregen door het verschil door P50 te delen  $((P50-P90)/P50)$ .

De berekende onzekerheidswaardes zijn ingedeeld in zeker en onzeker op basis van een drempelwaarde die is gekozen (expert opinie) bij de waarde 0,5. Dat wil zeggen dat  $P90 = 0,5 \cdot P50$ .



## Verwacht vermogen (P10) voor Rotliggendes reservoirs

**Legenda****Verwacht vermogen (P10)**

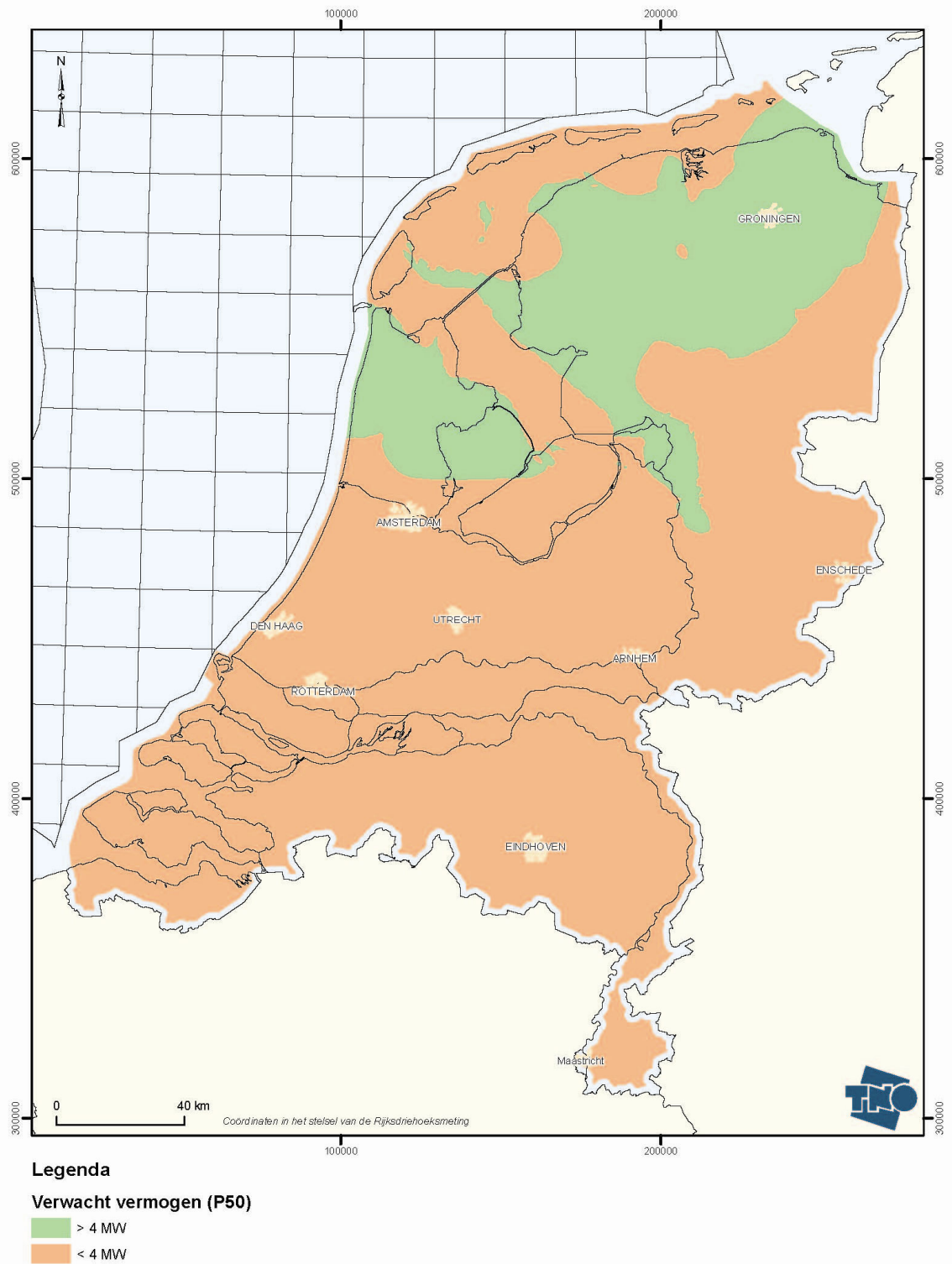
> 4 MW

< 4 MW

Figuur C8. Verwacht P10 vermogen van de Slochteren Formatie.

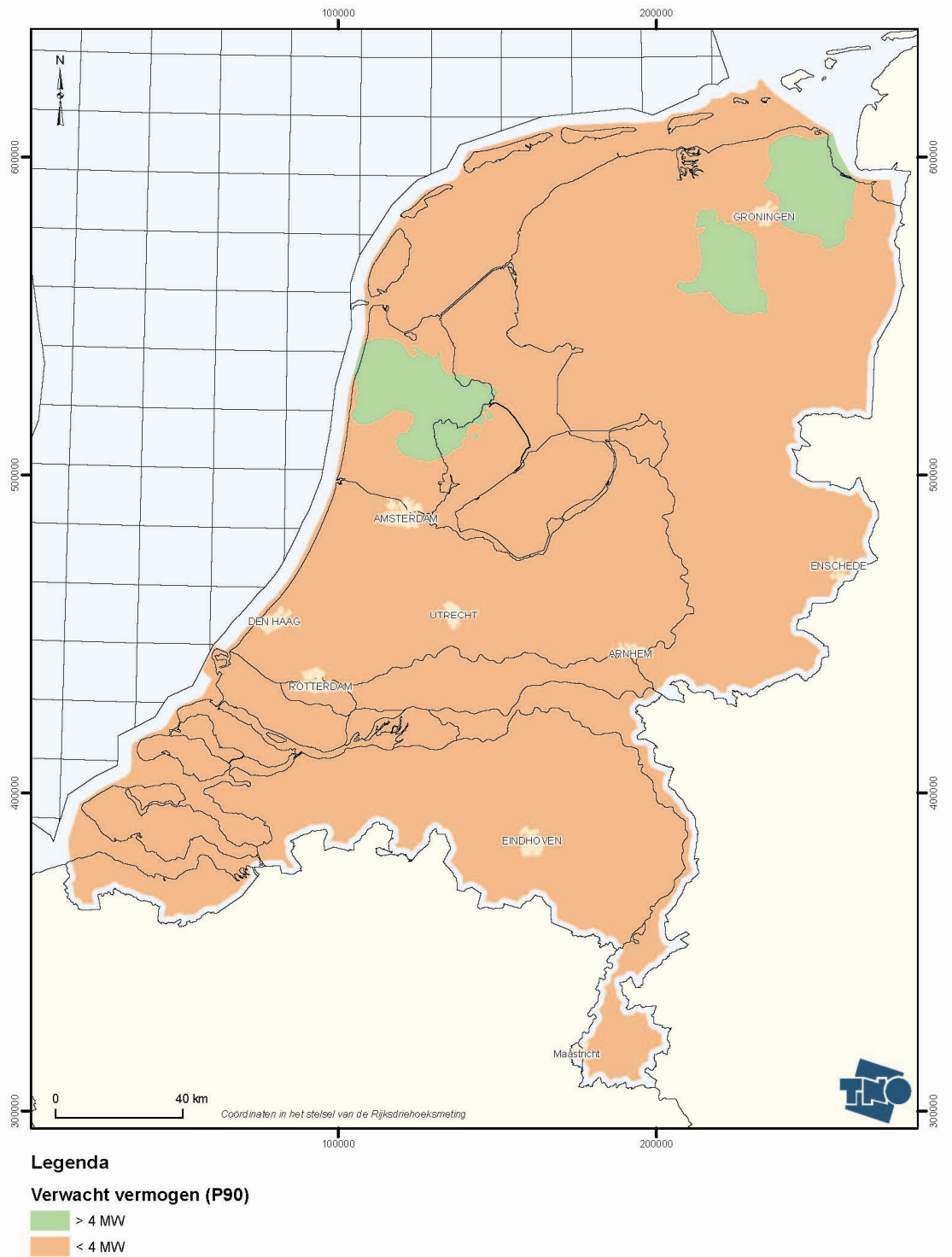


## Verwacht vermogen (P50) voor Rotliggendes reservoirs



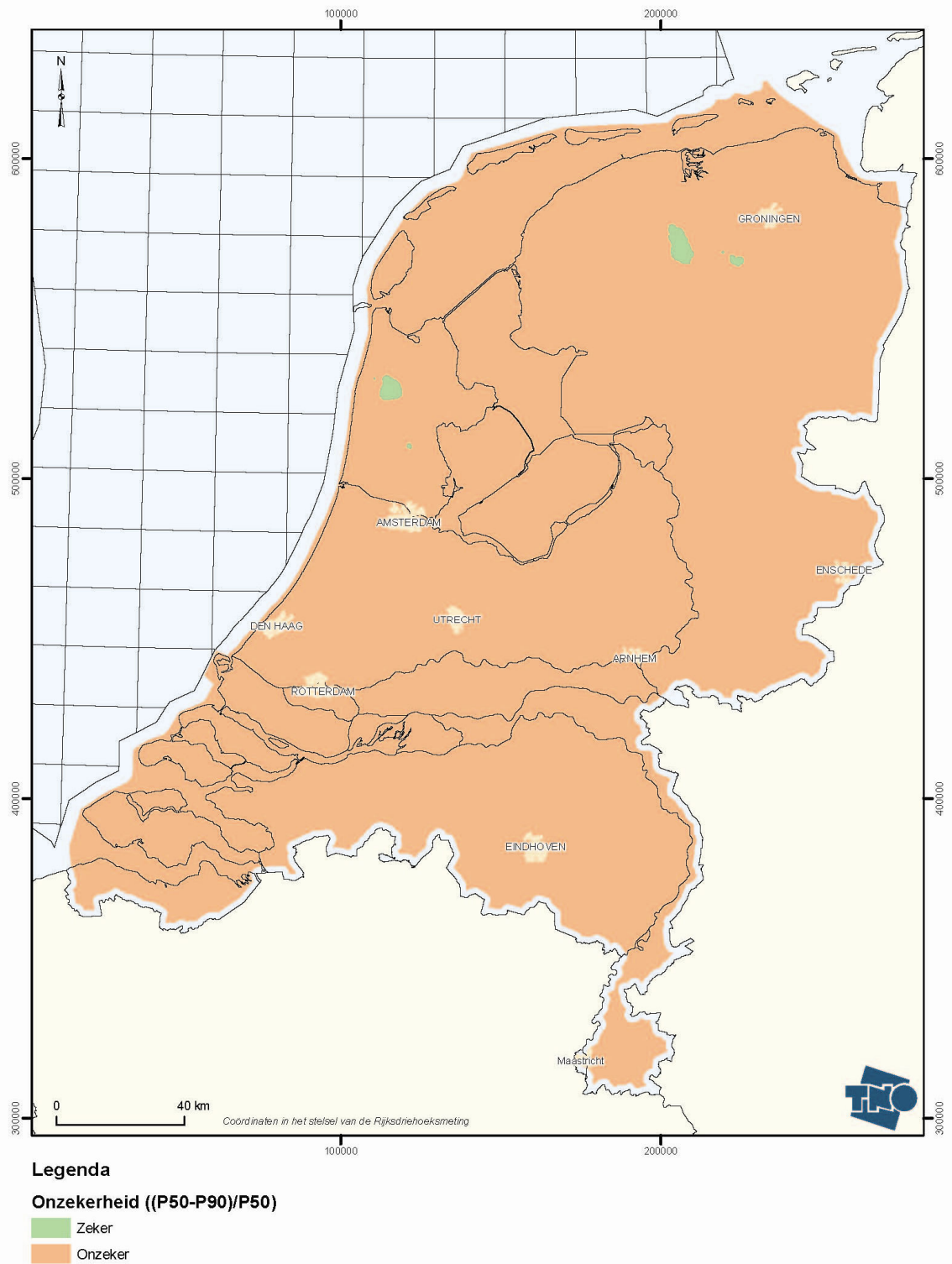
Figuur C9. Verwacht P50 vermogen van de Slochteren Formatie.

## Verwacht vermogen (P90) voor Rotliggendes reservoirs

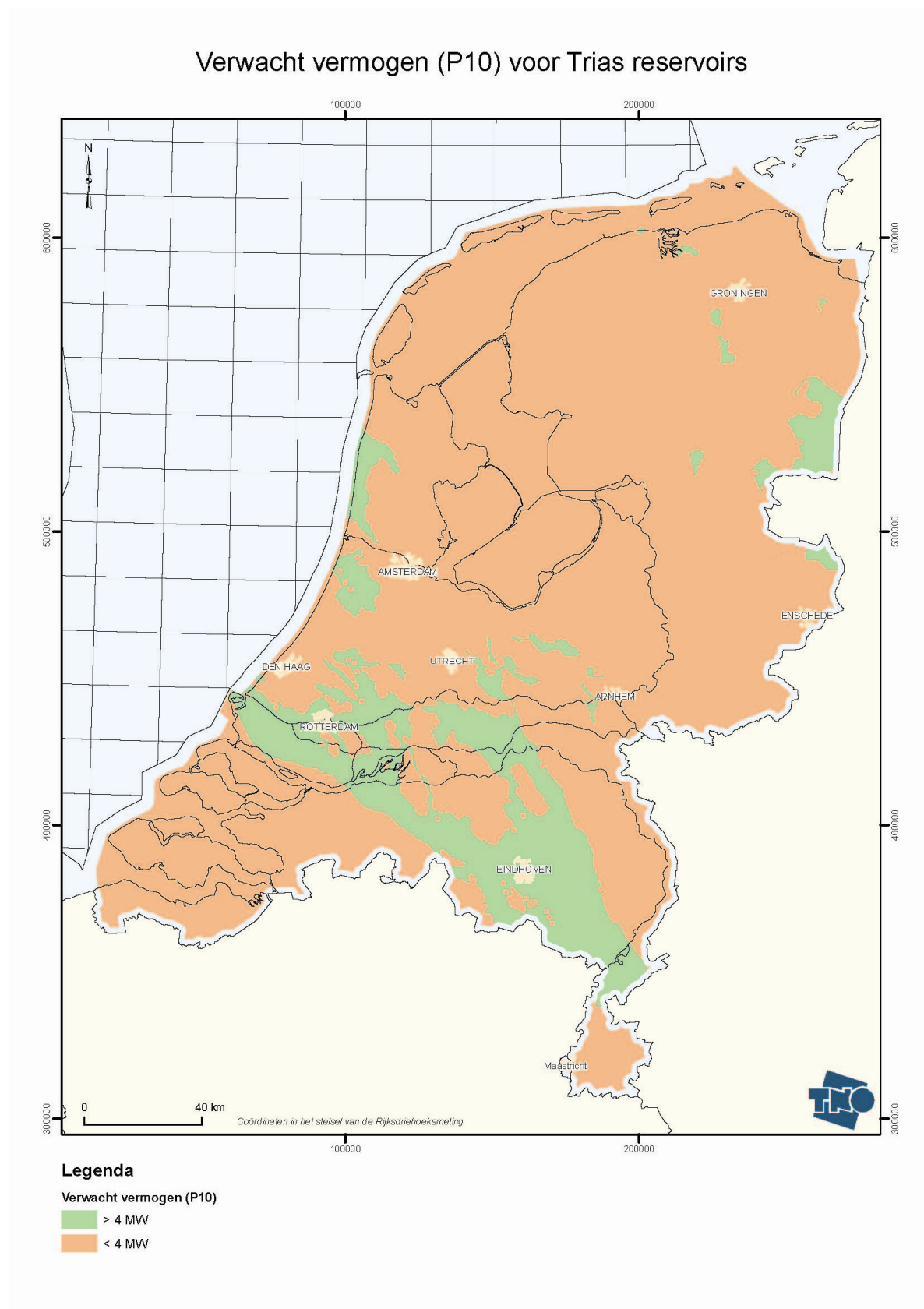


Figuur C10. Verwacht P90 vermogen van de Slochteren Formatie.

## Onzekerheid in het vermogen voor Rotliggendes reservoirs

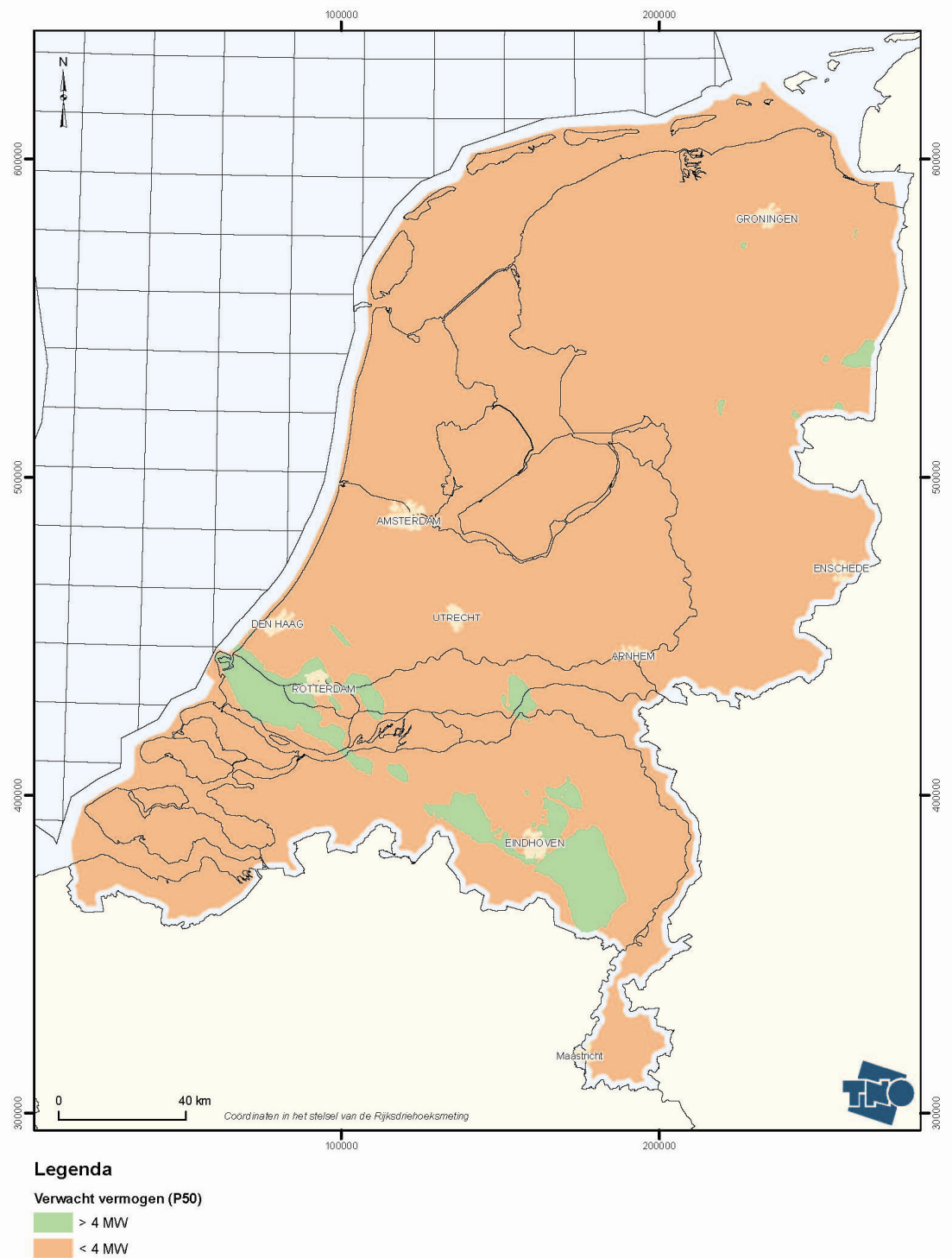


Figuur C11. Onzekerheid in het vermogen van de Slochteren Formatie.



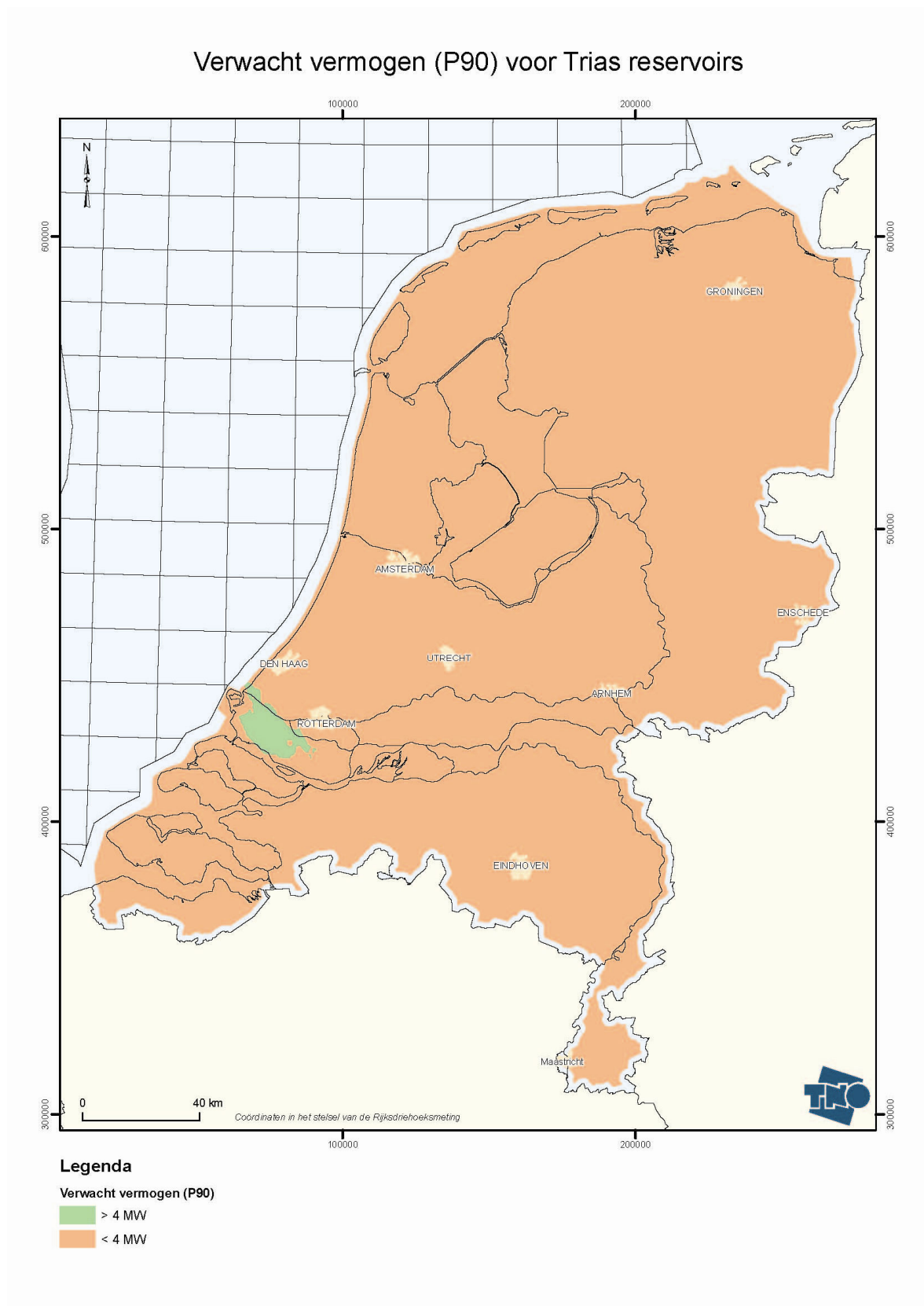
Figuur C12. Verwacht P10 vermogen van de Trias reservoirs.

### Verwacht vermogen (P50) voor Trias reservoirs



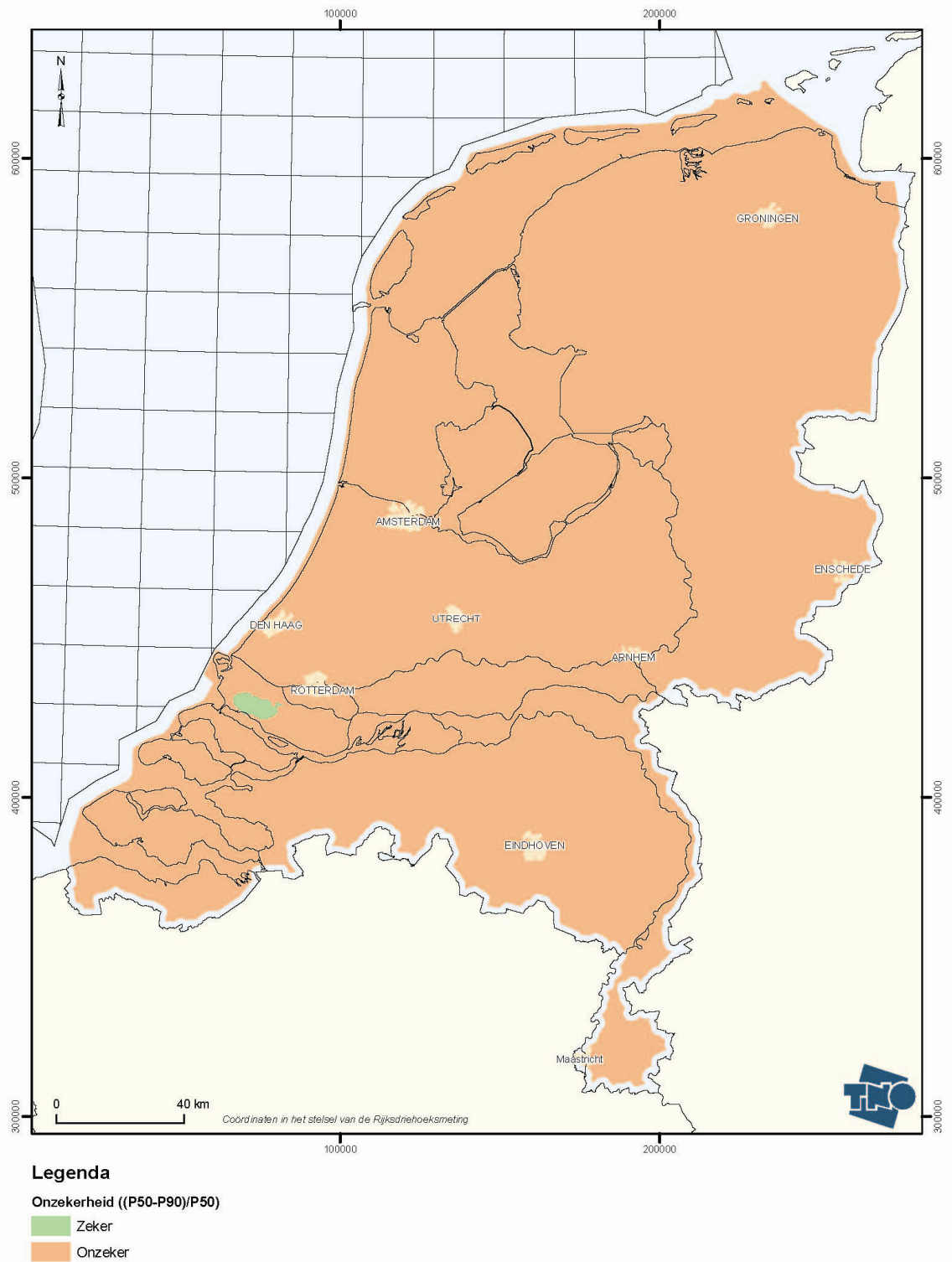
Figuur C13. Verwacht P50 vermogen van de Trias reservoirs.





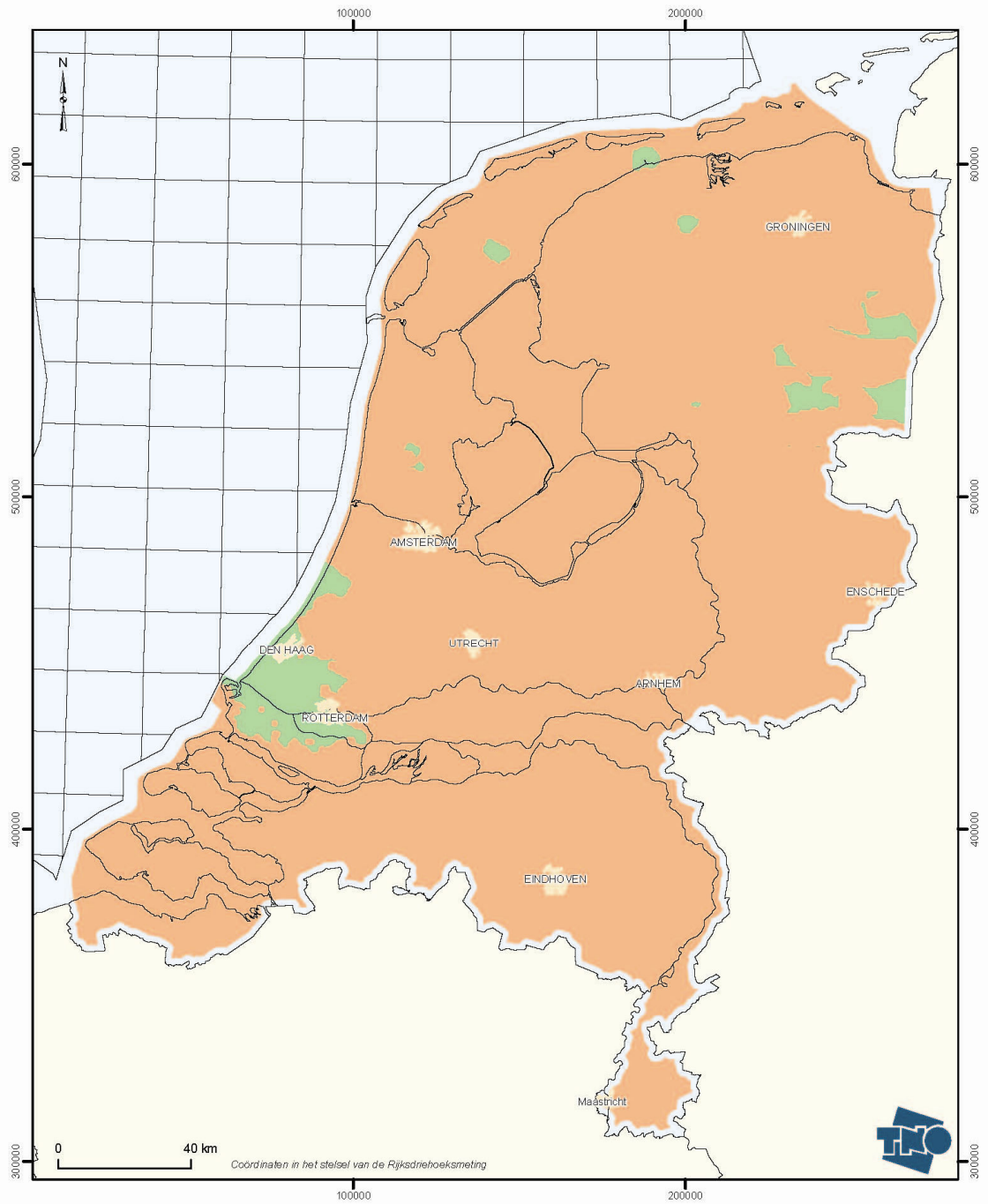
Figuur C14. Verwacht P90 vermogen van de Trias reservoirs.

### Onzekerheid in het vermogen voor Trias reservoirs



Figuur C15. Onzekerheid in het vermogen van de Trias reservoirs.

### Verwacht vermogen (P10) voor Onder Krijt reservoirs

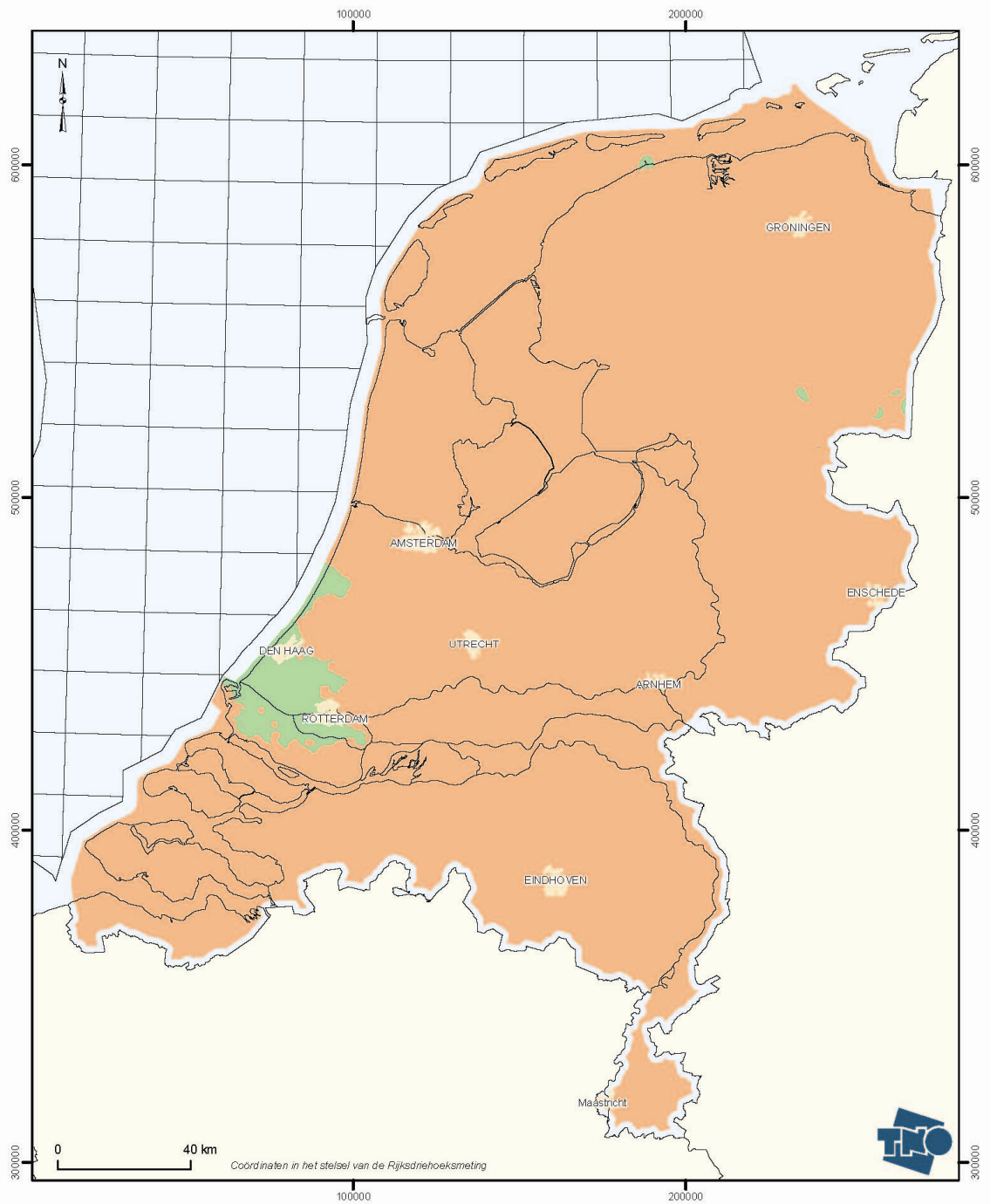


**Legenda**  
 Verwacht vermogen (P10)  
 > 4 MW  
 < 4 MW

Figuur C16. Verwacht P10 vermogen van de Onder-Krijt reservoirs.



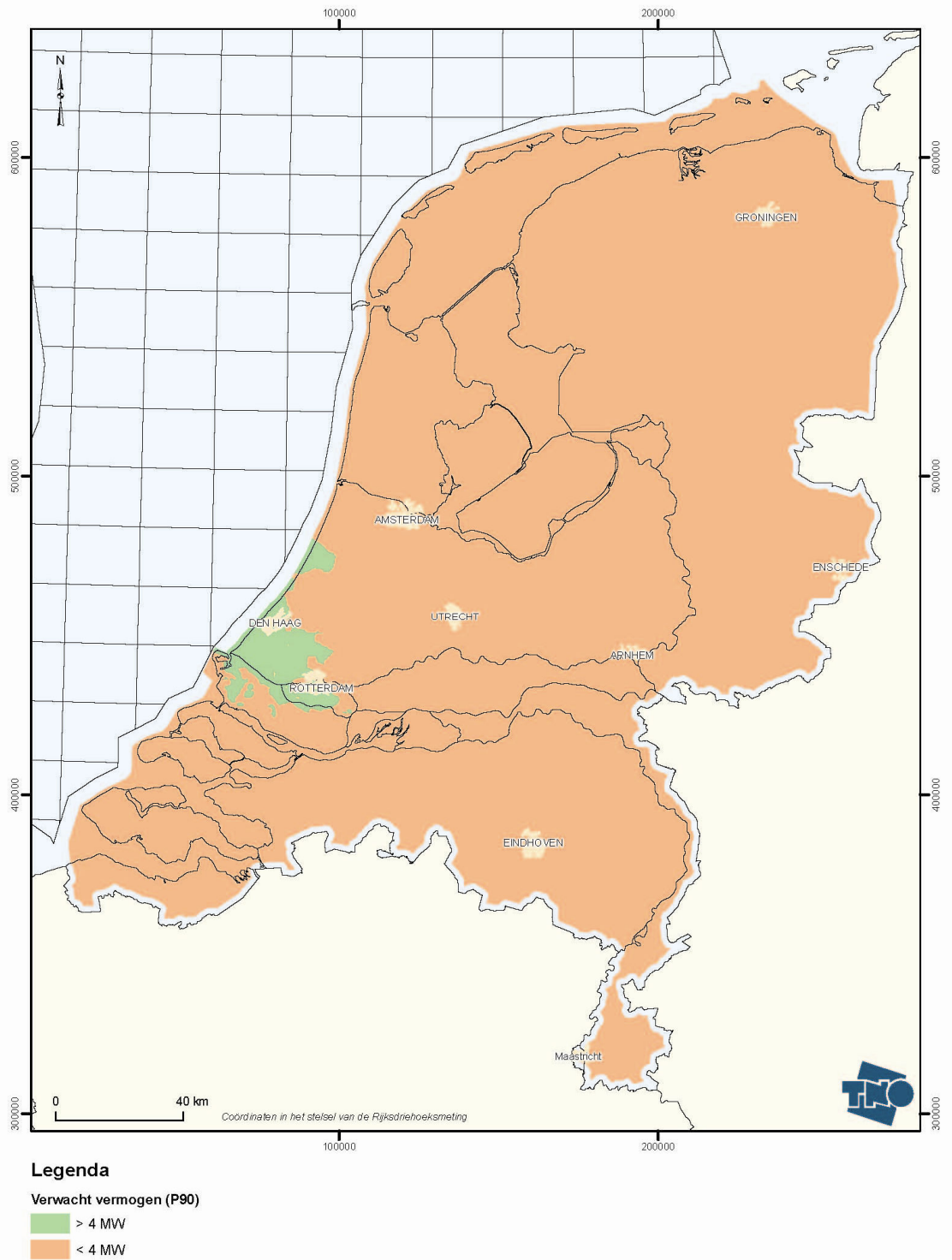
### Verwacht vermogen (P50) voor Onder Krijt reservoirs



**Legenda**  
**Verwacht vermogen (P50)**  
■ > 4 MW  
■ < 4 MW

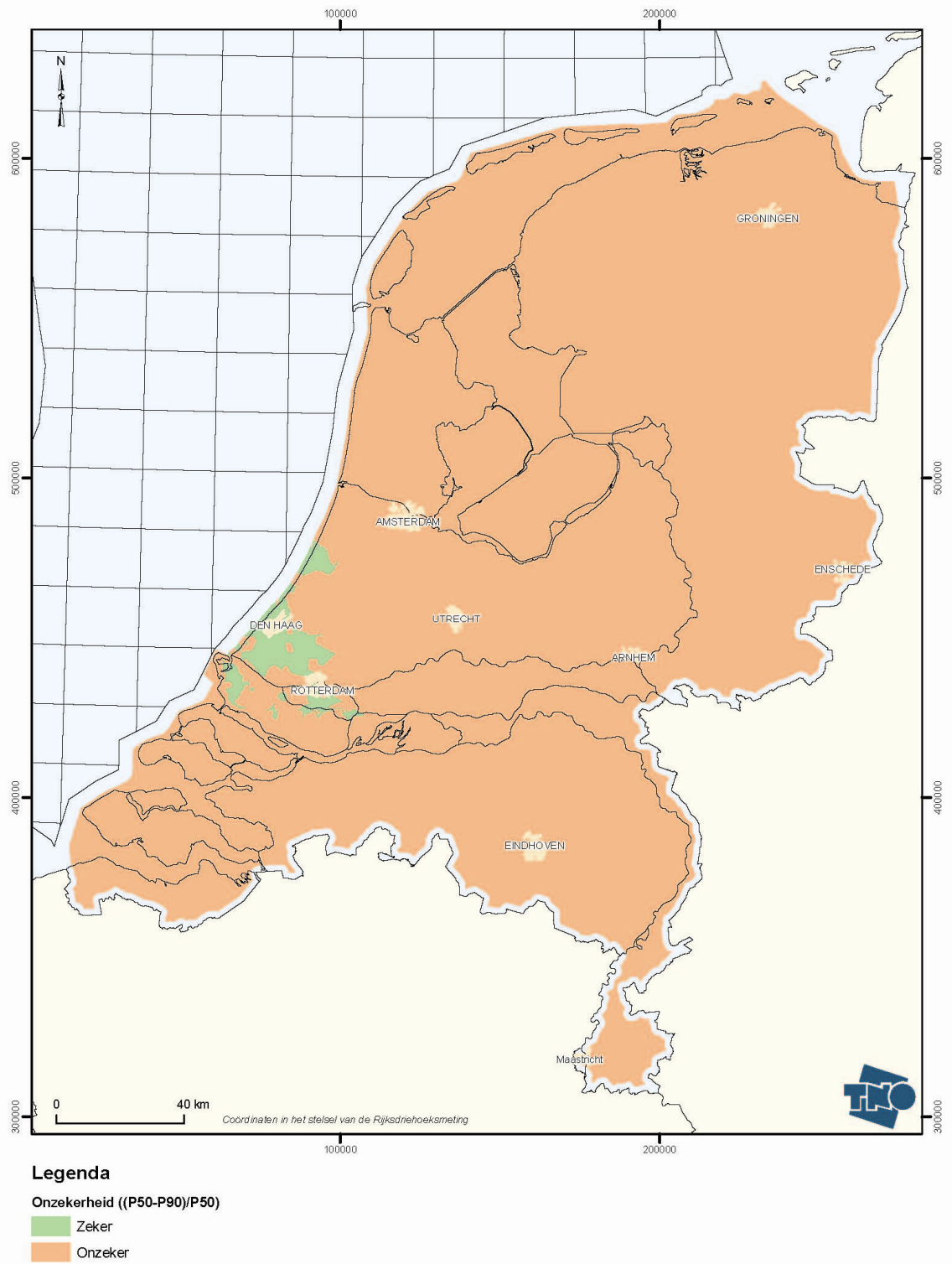
Figuur C17. Verwacht P50 vermogen van de Onder-Krijt reservoirs.

### Verwacht vermogen (P90) voor Onder Krijt reservoirs



Figuur C18. Verwacht P90 vermogen van de Onder-Krijt reservoirs.

### Onzekerheid in het vermogen voor Onder Krijt reservoirs



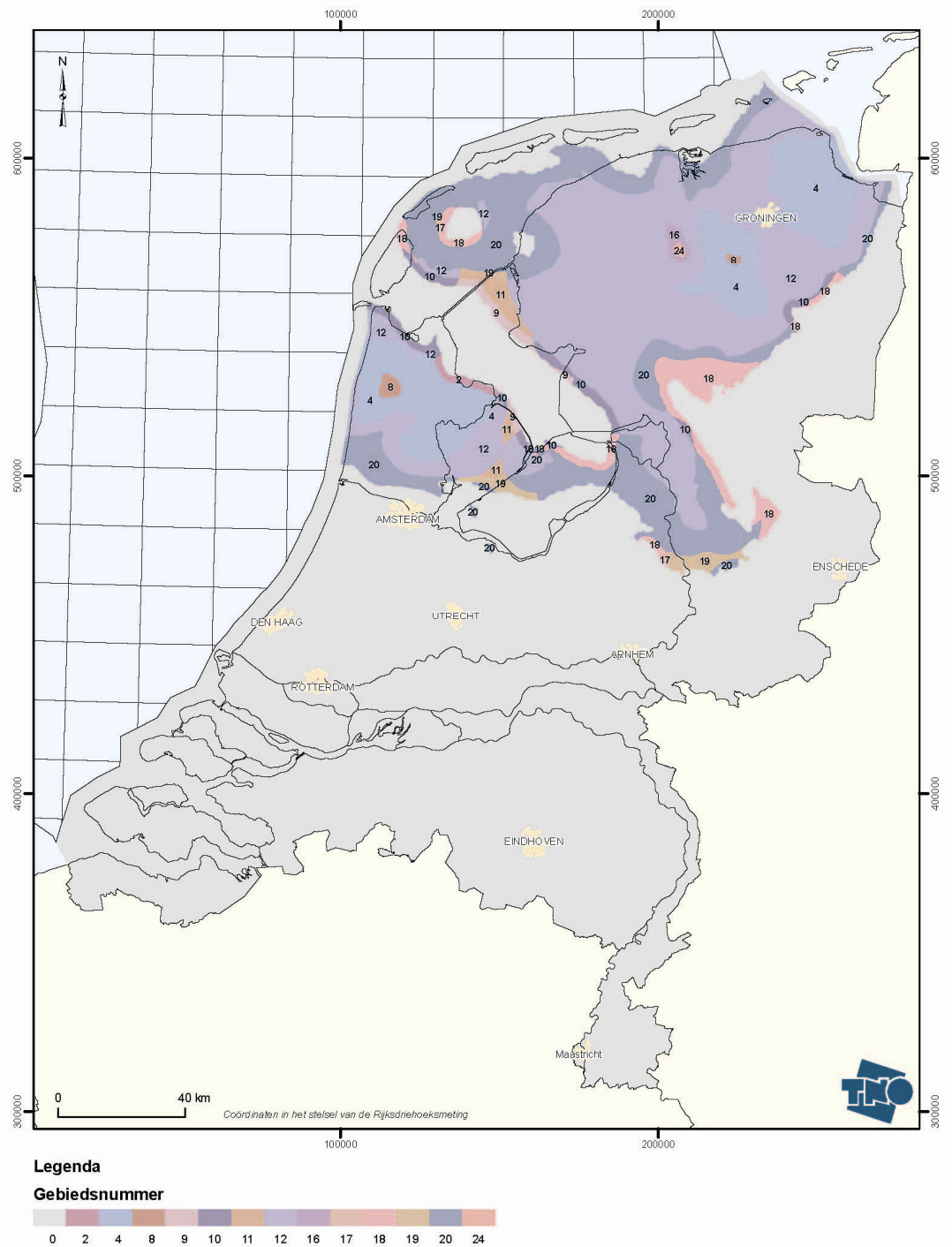
Figuur C19. Onzekerheid in het vermogen van de Onder-Krijt reservoirs.

## D Aardwarmte onzekerheidsgebieden kaart

De aardwarmte onzekerheidsgebieden kaart is het resultaat van de combinatie van zes basiskaarten (verwacht vermogen P90/P50/P10, de onzekerheid in het verwacht vermogen, de aard van de ondergrond en de datadichtheid). De onzekerheidsgebieden zijn gebieden waar aardwarmte potentie bestaat, maar het gebruik van aardwarmte door middel van maatregelen bevorderd zou kunnen worden. In de meeste gevallen zijn dit gebieden waar het verwachte P10 en P50 vermogen boven de 4 MW ligt en het verwachte P90 vermogen juist

Met behulp van ArcGIS software zijn de vlakken van de zes basiskaarten gecombineerd (Figuur 5). Het resultaat is een kaart met vlakken waaraan de verschillende combinaties zoals weergegeven in Tabel 1 (kolom “Beleidskaart gebiedsnummer”) zijn toegekend. In Tabel 1 is als voorbeeld met zwart aangegeven welke combinatie van gegevens in de zes basiskaarten leidt tot gebiedsnummer 12. Figuren D1 tot en met D3 geven de aardwarmte onzekerheidsgebiedenkaarten voor het Slochteren Fm., de Trias en Onder-Krijt reservoirs.

### Aardwarmte onzekerheidsgebieden voor Rotliedendes reservoirs

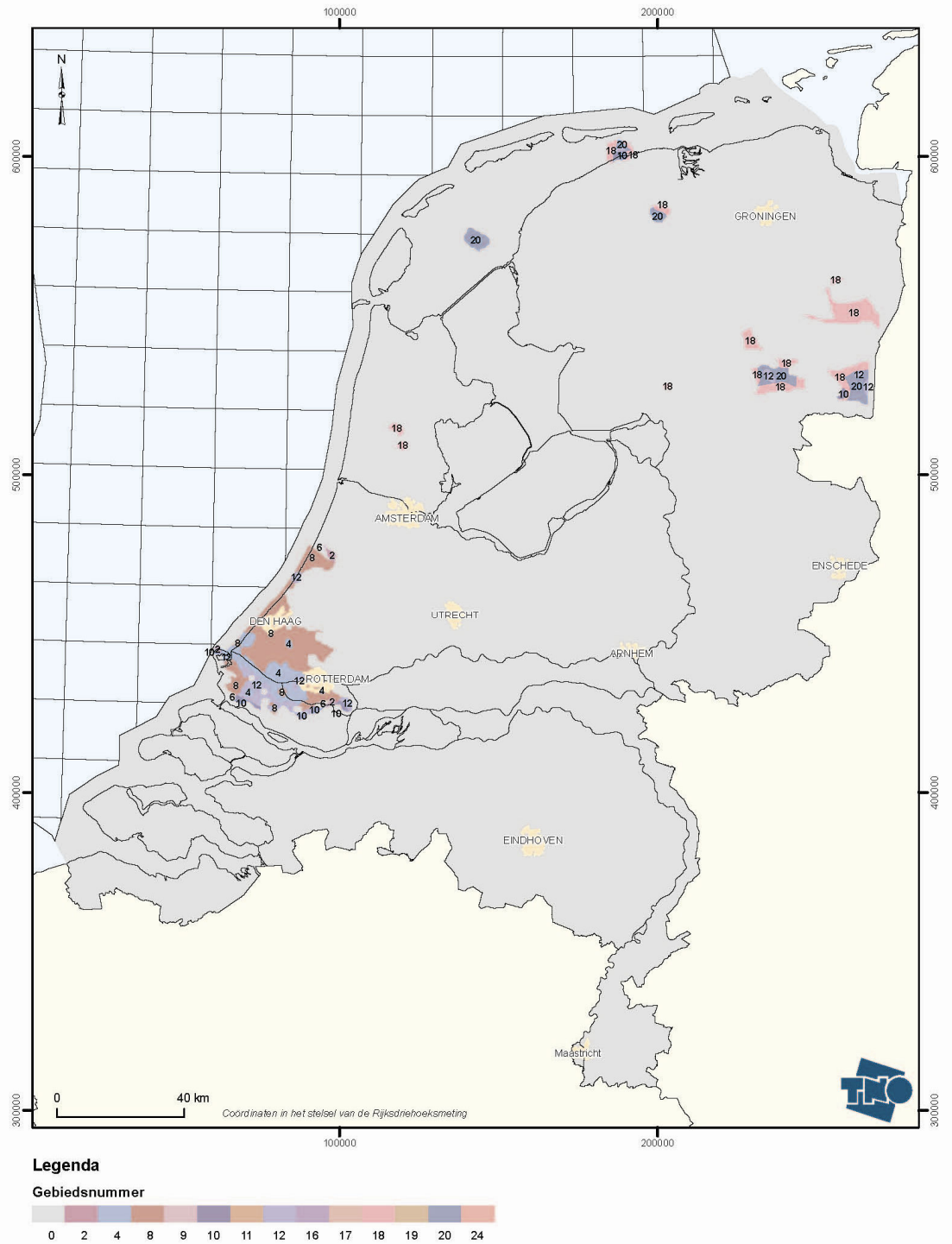


Figuur D1. Onzekerheidsgebieden kaart voor de Slochteren Formatie. Aan de hand van de gebiedsnummers kan de maatregel bepaald worden die in Tabel 1 zijn opgesomd.





### Aardwarmte onzekerheidsgebieden voor Onder Krijt reservoirs



Figuur D3. Onzekerheidsgebieden kaart voor de Onder-Krijt reservoirs. Aan de hand van de gebiedsnummers kan de maatregel bepaald worden die in Tabel 1 zijn opgesomd.

## E Maatregelen aardwarmte kaart

De maatregelen aardwarmte kaart is gebaseerd op de aardwarmte onzekerheidsgebieden kaart (Appendix D). Aan de gebieden is een maatregel toegekend op basis van Tabel 1, waar in de twee rechter kolommen de maatregel behorende bij een gebiedsnummer is weergegeven.

Aan een aantal gebieden is geen maatregel voorzien voor het verkleinen van het verschil tussen P90 en P50 (in de figuren afgekort tot *geen maatregel voorzien*). Het gaat om gebieden waar:

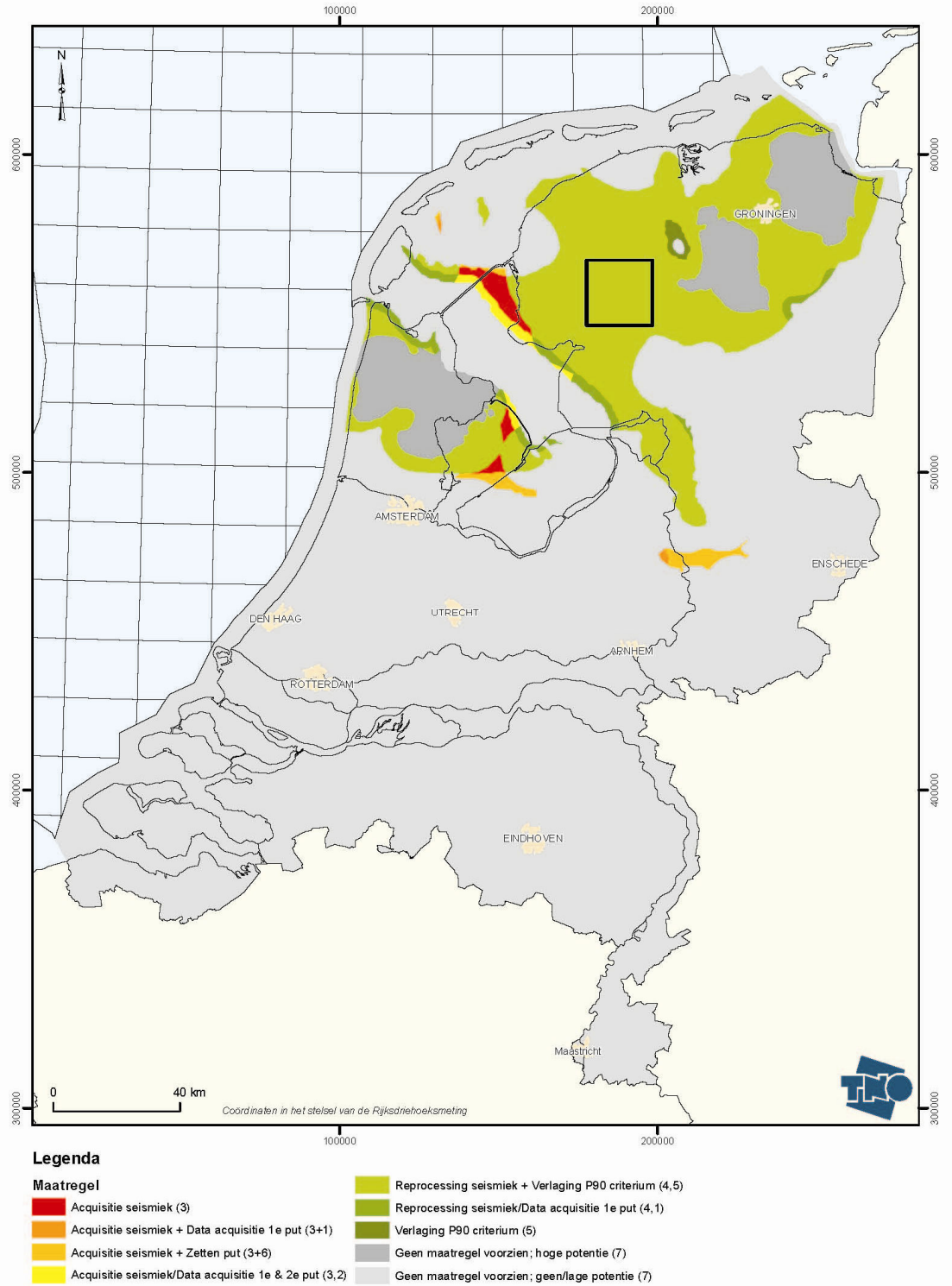
Het verwachte P90, P50 en P10 aardwarmte vermogen lager is dan 4 MW (gebiedsnummer 0). In deze gebieden bestaat een grote kans op het aantreffen van een aquifer met geen of heel lage aardwarmte potentie, waardoor maatregelen weinig nut hebben;

Het verwachte P90 en P50 aardwarmte vermogen lager is dan 4 MW (18, 20, 23, 24). In deze gebieden bestaat een grote kans op het aantreffen van een aquifer met een lage aardwarmte potentie, waarbij het nemen van maatregelen weinig succes zal hebben;

Het verwachte P90, P50 en P10 aardwarmte vermogen hoger is dan 4 MW (gebiedsnummers 2, 4, 5, 6, 7, 8). Hier heeft de aquifer naar verwachting een hoge aardwarmte potentie en zijn maatregelen overbodig.

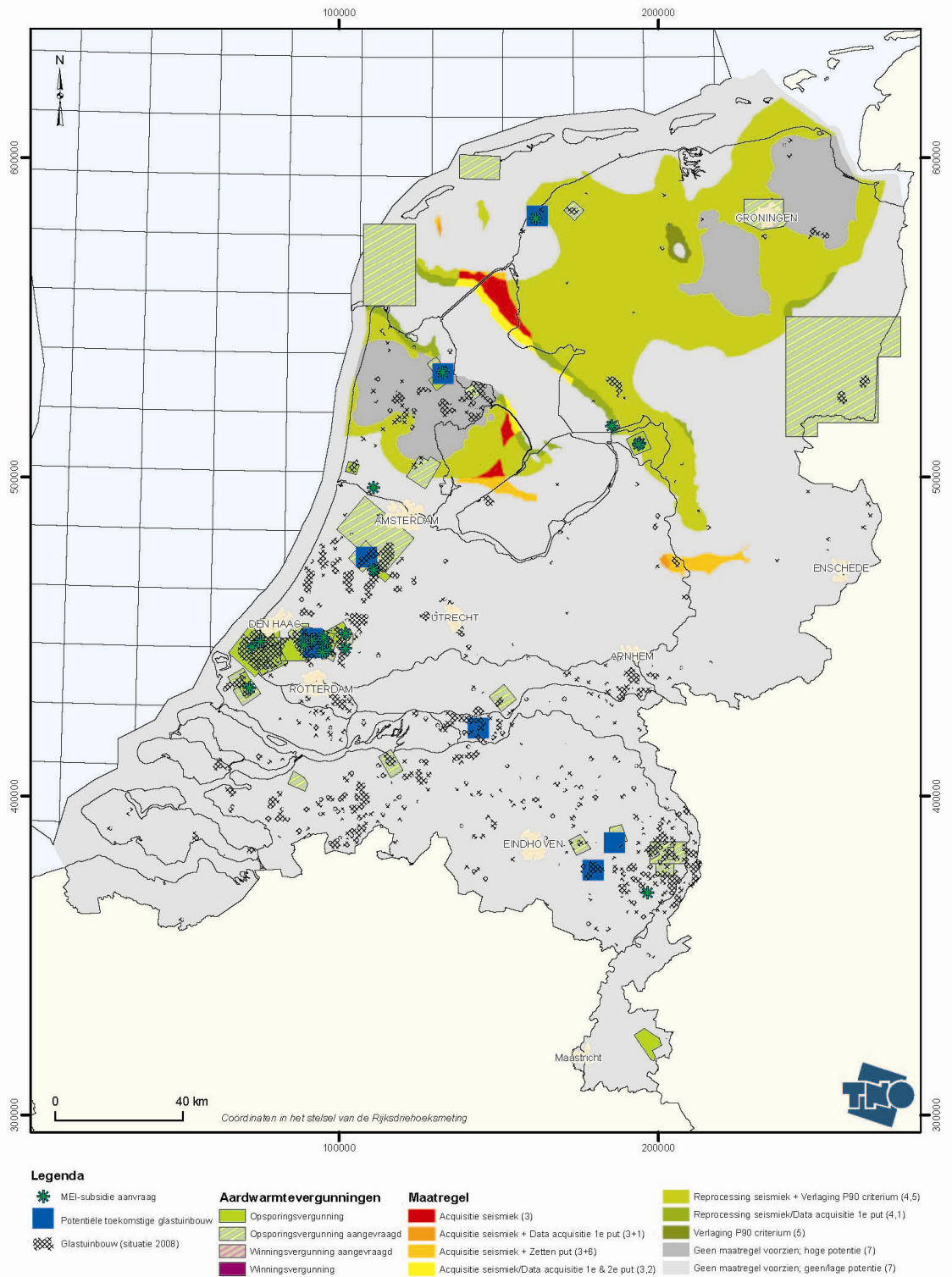


### Maatregelen aardwarmte voor Rotliegendes reservoirs



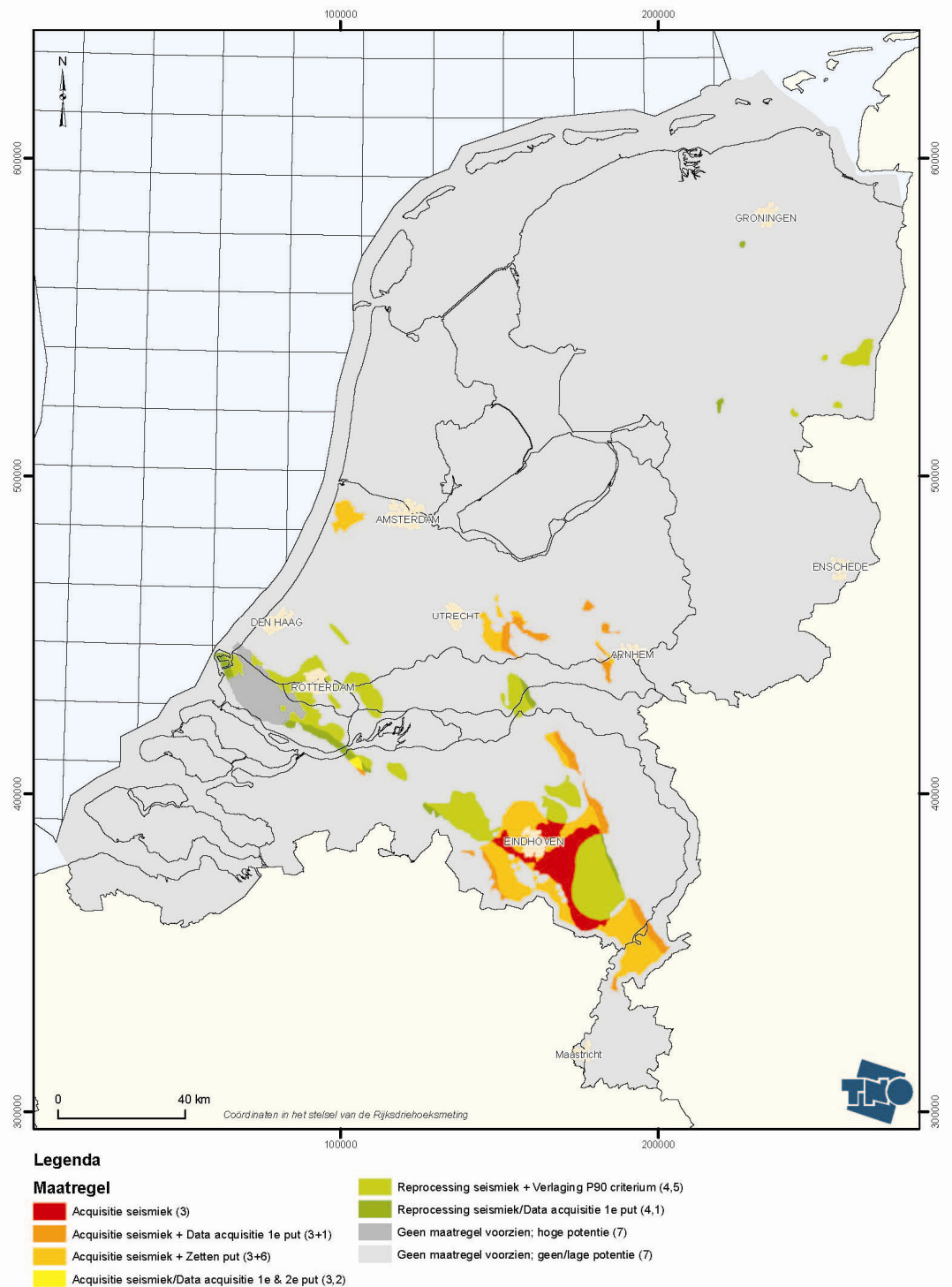
Figuur E1. Maatregelenkaart voor de Slochteren Formatie (zie ook Tabel 1 & 2).

### Maatregelen aardwarmte voor Rotliegendes reservoirs



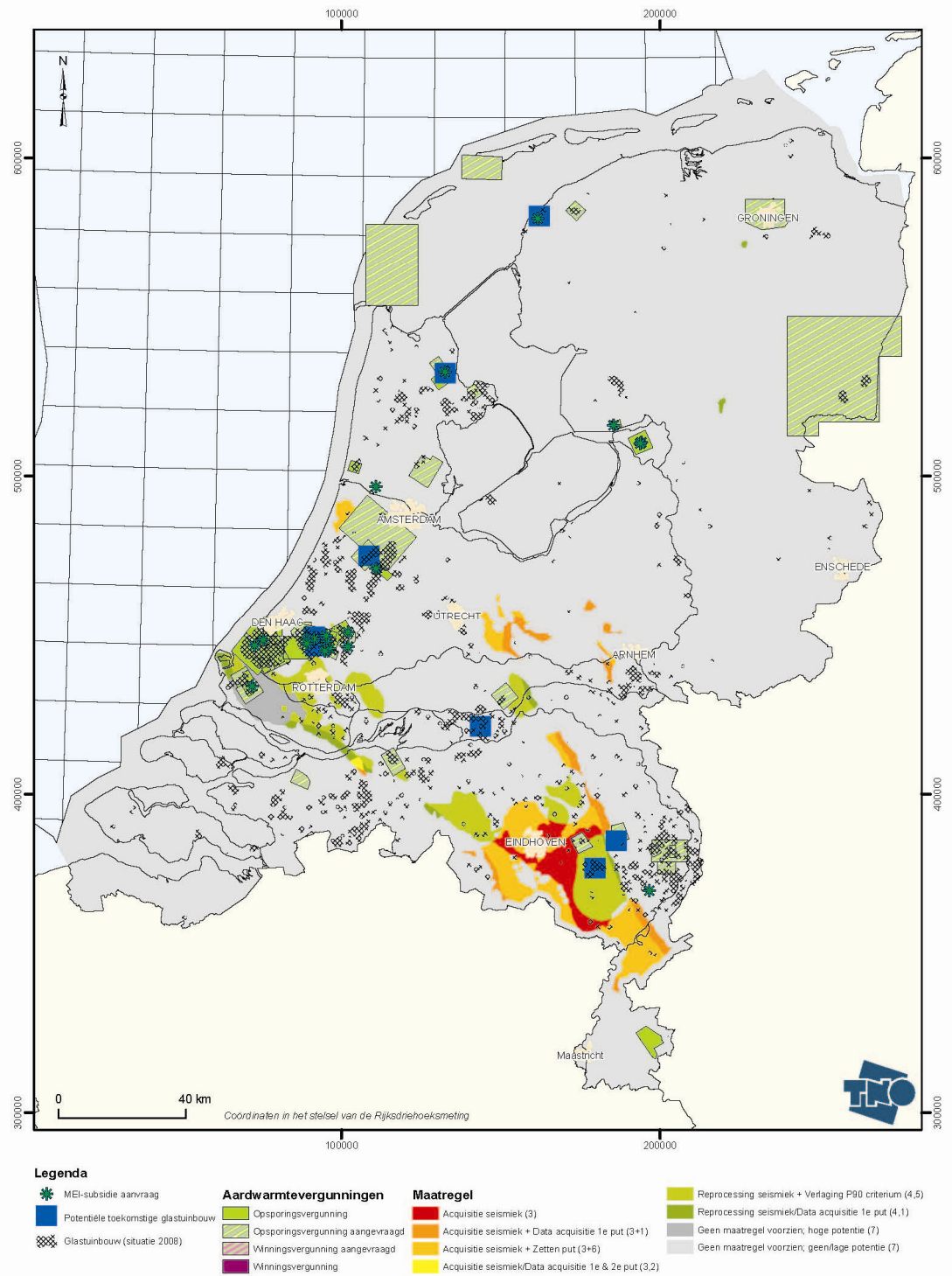
Figuur E2. Maatregelenkaart voor de Slochteren Formatie inclusief kassen, planning toekomstige glastuinbouw, MEI-subsidie- en opsporingsaanvragen.

### Maatregelen aardwarmte voor Trias reservoirs



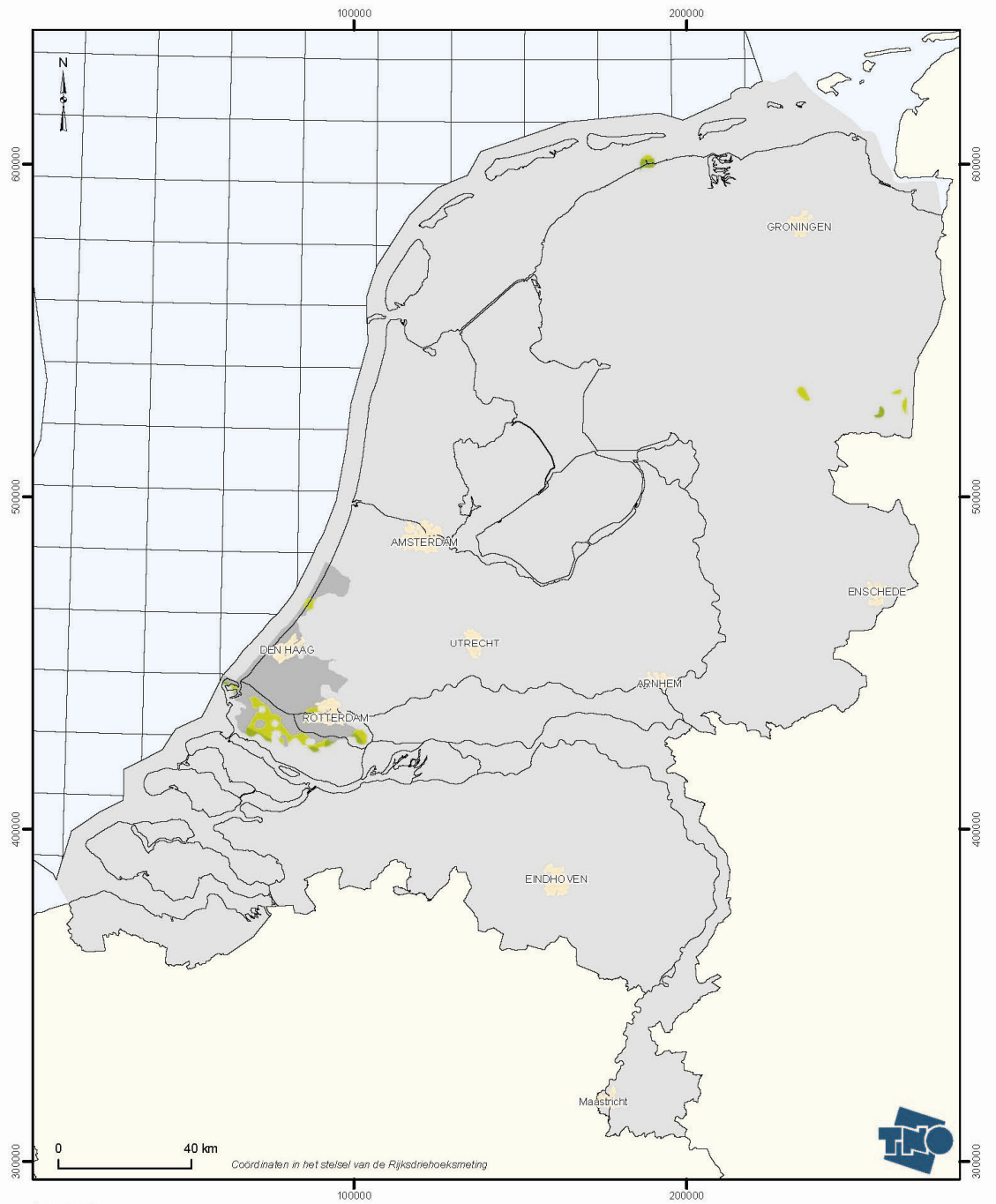
Figuur E3. Maatregelenkaart voor de Trias reservoirs (zie ook Tabel 1 & 2).

### Maatregelen aardwarmte voor Trias reservoirs



Figuur E4. Maatregelenkaart voor de Trias Formatie inclusief kassen, planning toekomstige glastuinbouw, MEI-subsidie- en opsporingsaanvragen.

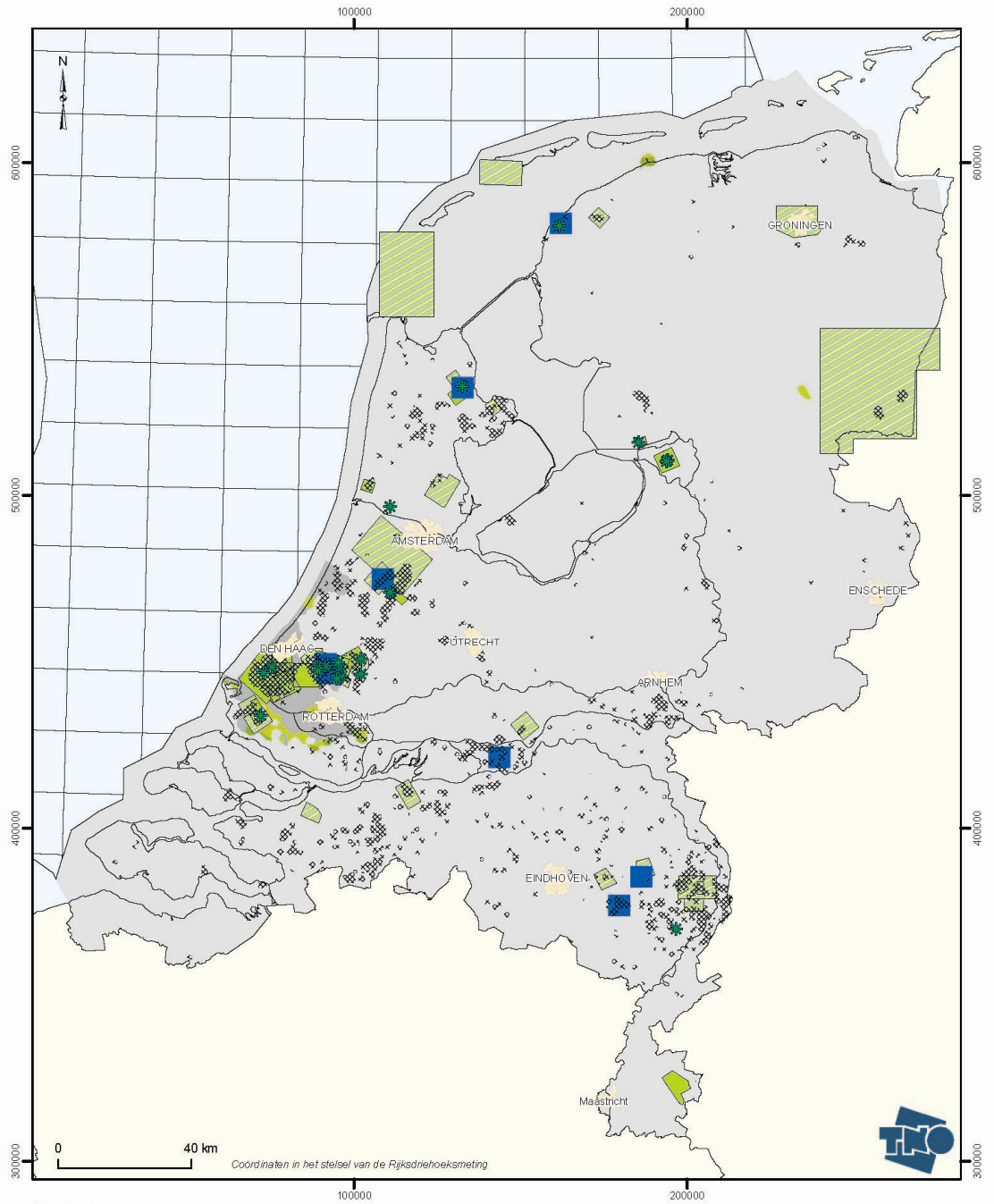
### Maatregelen aardwarmte voor Onder Krijt reservoirs



Figuur E5. Maatregelenkaart voor de Onder-Krijt reservoirs (zie ook Tabel 1 & 2).



### Maatregelen aardwarmte voor Onder Krijt reservoirs



**Legenda**

- |   |   |  |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li> MEI-subsidie aanvraag</li> <li> Potentiële toekomstige glastuinbouw</li> <li> Glastuinbouw (situatie 2008)</li> </ul> | <p><b>Aardwarmtevergunningen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li> Opsporingsvergunning</li> <li> Opsporingsvergunning aangevraagd</li> <li> Winningsvergunning aangevraagd</li> <li> Winningsvergunning</li> </ul> | <p><b>Maatregel</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li> Reprocessing seismiek + Verlaging P90 criterium (4,5)</li> <li> Reprocessing seismiek/Data acquisitie 1e put (4,1)</li> <li> Geen maatregel voorzien; hoge potentie (7)</li> <li> Geen maatregel voorzien; geen/lage potentie (7)</li> </ul> |
|---|---|--|

Figuur E6. Maatregelenkaart voor de Onder-Krijt Formatie inclusief kassen, planning toekomstige glastuinbouw, MEI-subsidie- en opsporingsaanvragen.