



KWRW 2025.058 | Augustus 2025

**Verkenning van de invloed
van condities op de
potentiële impact van een
brijnlekkage uit een
geothermieput op de
onttrokken waterkwaliteit
in een grondwaterwinning**

Colofon

Verkenning van de invloed van condities op de potentiële impact van een brijnlekkage uit een geothermieput op de onttrokken waterkwaliteit in een grondwaterwinning

Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van KWR Waterwijs, het collectieve drinkwateronderzoeksprogramma van KWR, de waterbedrijven en Vewin.

KWRW 2025.058 | Augustus 2025

Projectnummer

404300-155

Projectmanager

ir. J.A.G. (Jos) Frijns

Opdrachtgever

KWR Waterwijs – Beleidsonderbouwend Onderzoek

Auteur(s)

L.P. (Lennart) Brokx MSc., dr. N. (Niels) Hartog

Kwaliteitsborger(s)

dr. N. (Niels) Hartog

Verzonden naar

Dit rapport is verspreid onder deelnemers aan het KWR Waterwijs-programma en is openbaar na publicatie

Keywords

Geothermie, Grondwaterwinning, Waterkwaliteit, Risico's

Bron omslagfoto: Vewin

Jaar van publicatie
2025

Meer informatie

dr. N. (Niels) Hartog
T +31 30 606 9652
E niels.hartog@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

The logo for KWR, consisting of the letters 'KWR' in a bold, blue, sans-serif font.

Augustus 2025 ©

Alle rechten voorbehouden aan de KWR Waterwijs-deelnemers. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier.

Samenvatting

Als onderdeel van de energietransitie zal het aantal geothermiesystemen in Nederland naar verwachting de komende decennia sterk toenemen. Hierbij zijn er zorgen over de negatieve impact die een eventuele lekkage van geothermische brijn (ook wel formatiewater genoemd) uit een geothermische put op de ruwwaterkwaliteit van een grondwaterwinning voor drinkwaterproductie zou kunnen hebben. Mede vanwege dit risico worden geothermiesystemen uitgesloten binnen de grondwaterbeschermingsgebieden (vaak de 25-jaarszone) van grondwaterwinningen. Binnen Nationale Grondwaterreserves is het standpunt van Vewin op dit moment dat geothermie, enkel onder strikte voorwaarden, zou kunnen worden toegestaan. Dit vormde de aanleiding voor het hier gerapporteerde onderzoek, waarin verkend is hoe verschillende condities de potentiële impact van eventuele brijnlekages op grondwaterwinningen bepalen, om inzicht te krijgen welke aspecten van belang zijn om rekening mee te houden bij het bepalen van die voorwaarden.

Aan de hand van een set analytische berekeningen is verkend wat de impact van een eventuele brijnlekkage in het intrekgebied van een grondwaterwinning op de onttrokken waterkwaliteit bij winning zou kunnen zijn en hoe deze afhangt van verschillende condities, zoals de brijnconcentratie- en temperatuur, lekkagedebiet en -duur, en grondwaterreistijd naar een grondwaterwinning met een bepaald onttrekkingsdebiet. Zowel de impact op de thermische als op de chemische waterkwaliteit van onttrokken grondwater is beschouwd. Vanwege het grote aantal parameters en de concentratieverschillen tussen verschillende brijnen, is, ter versimpeling voor die impact op chemische waterkwaliteit, chloride als indicatieparameter gebruikt. Dit omdat voor alle bekende geothermische brijnen in Nederland deze concentratie t.o.v. de drinkwaternorm relatief hoog in tegenstelling tot veel andere parameters en zich tijdens grondwatertransport richting de winning conservatief gedraagt (bv. geen adsorptie of afbraak). De impact van chloride op de onttrokken grondwaterkwaliteit is dus relatief hoog en snel bij de winning. Voor een indicatie van de potentiële impact zijn met behulp van generieke analytische vergelijkingen de invloed van grondwatertransport en vermenging in de richting van de stroming door longitudinale dispersie, de samenkomende stroombanen voor een individuele winput en op winningsniveau beschouwd.

- Een relatief kleine lekkage bij de injectieput van een geothermiesysteem binnen het intrekgebied van een grondwaterwinning kan al leiden tot een negatieve impact op de onttrokken waterkwaliteit, dus ook als deze lekkage buiten een grondwaterbeschermingsgebied plaatsvindt. Dit kan leiden tot overschrijdingen van de drinkwaternorm in het ruwwater, zoals blijkt uit de beschouwing in deze studie voor chloride door de relatief hoge concentratie in Nederlandse geothermische brijnen (3-10 keer zeewater). De thermische impact bij een eventuele brijnlekkage op het water in een grondwaterwinning zou zeer beperkt blijven ($<1^{\circ}\text{C}$).
- Kleinere winningen zijn gevoeliger voor de impact van een eventuele brijnlekkage dan grotere winningen doordat een grondwaterwinning door het mee-onttrekken van omringend 'schoon' grondwater voor de belangrijkste verdunning van het met brijn verontreinigde grondwater zorgt.
- Bij een continue brijnlekkage zorgt een langere reistijd tot een grondwaterwinning er vooral voor dat de impact hiervan later optreedt en daarmee meer tijd is voor maatregelen (als de lekkage snel genoeg gedetecteerd wordt). Voor stoffen die niet afbreken, zoals chloride, zou de impact op de winning hetzelfde blijven ongeacht de reisafstand.
- Voor een eventuele lekkage, met een bepaald lekdebiet en brijnsamenstelling, wordt de impact op een winning met name bepaald door de lekkageduur. Ten opzichte van een continue lekkage zorgt het relatief snel (binnen enkele maanden) detecteren en stoppen van een lekkage voor sterke afname van zowel de piekconcentratie die in de winning terecht komt als de tijdsduur van de negatieve impact. Tijdige detectie kan de negatieve impact van brijnlekages uit geothermieputten op de onttrokken waterkwaliteit in grondwaterwinningen sterk beperken en mogelijk helpen voorkomen bijvoorbeeld door tijdige sanering.

Inhoud

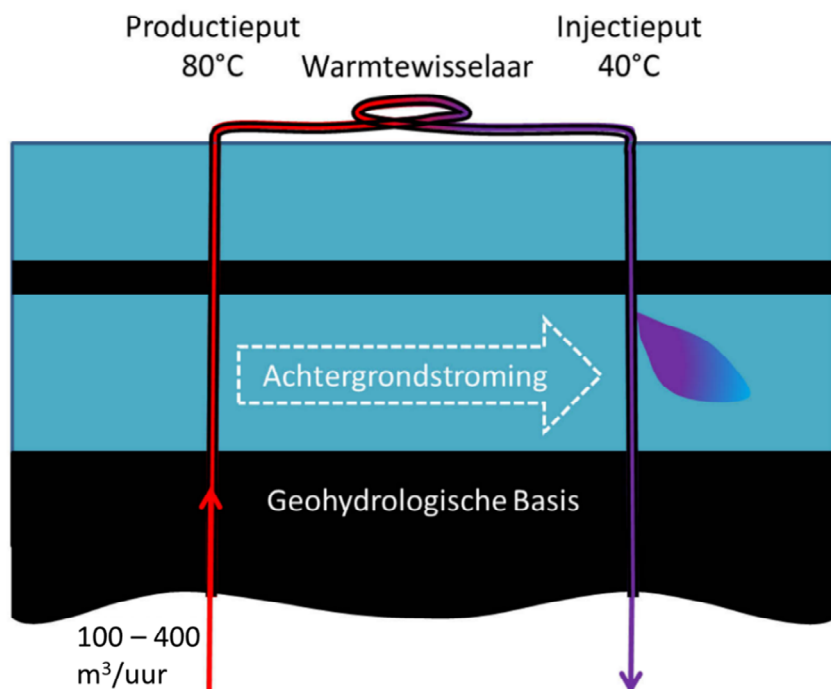
Colofon	1
Inhoud	3
1 Inleiding	4
1.1 Aanleiding	4
1.2 Afbakening onderzoek	5
2 Onderzoeksopzet	6
2.1 Lekkage naar grondwater	6
2.1.1 Samenstelling geothermisch brijn en impact op grondwaterwinning	6
2.1.2 Lekdebiet	7
2.2 Transport naar grondwaterwinning	7
2.3 Bereiken van grondwaterwinning	9
2.4 Opzet en aannames	9
2.4.1 Continue lekkage: mengverhouding	9
2.4.2 Continue lekkage: doorbraak	9
2.4.3 Tijdelijke lekkage: doorbraak	9
2.4.4 Beschouwde basiscondities	10
3 Resultaten	11
3.1 Continue lekkage: mengverhouding	11
3.2 Continue lekkage: doorbraak	11
3.3 Tijdelijke lekkage: doorbraak	13
3.4 Invloed en interactie verschillende factoren	15
4 Discussie	17
4.1 Brijnsamenstelling en de impact van lekkage op grondwaterwinningen	17
4.2 Belang van korte lekkageduur en lekdetectie voor beperken impact op winningen	17
4.3 Geothermie in NGR-gebieden	18
4.4 Invloed van casus-specifieke condities op de mogelijke impact	18
5 Conclusies en aanbevelingen	20
5.1 Conclusies	20
5.2 Aanbevelingen	20
6 Referentielijst	22
I Analytische methoden	23

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Ten behoeve van de energietransitie wordt steeds vaker naar de ondergrond gekeken. Zo heeft de rijksoverheid de ambitie om het aantal geothermiesystemen sterk te laten groeien, van 32 in 2023 naar 75 in 2030 (van der Molen & Tolsma, 2024). Anderzijds is de ondergrond van groot belang in het voorzien van grondwater als zoetwaterbron voor de drinkwatersector, welke ook te maken zal hebben met een groeiende vraag naar drinkwater in dezelfde periode (IPO et al., 2025). Om grondwaterwinningen ten behoeve van drinkwaterproductie te helpen beschermen is geothermie, ook wel aardwarmtewinning, uitgesloten binnen waterwingebieden, grondwaterbeschermingsgebieden en boringvrije zones. Er zijn echter ook andere gebieden waarbinnen de belangen van drinkwater en geothermie elkaar tegen kunnen komen. Voor Aanvullende Strategische Voorraden (ASVs) is het standpunt van Vewin uitsluiting maar voor de Nationale Grondwater Reserves (NGRs) is het standpunt van Vewin op dit moment dat geothermie enkel onder strikte voorwaarden zou kunnen worden toegestaan. Dit komt voort uit het feit dat dit relatief grote gebieden zijn en er geen actueel drinkwaterbelang is. Wat deze strikte voorwaarden zouden moeten zijn, is nog niet bepaald.

Eerder onderzoek heeft laten zien dat het realiseren van en produceren met een geothermiesysteem verschillende risico's voor de grondwaterkwaliteit heeft (Hartog, 2016). Een daarvan is het risico op lekkage van geothermisch brijn (zouter dan zeewater, en wordt ook wel formatiewater genoemd en dat van nature aanwezig is in geothermische reservoirs) vanuit een geothermieput naar het omringende watervoerend pakket (Figuur 1-1).



Figuur 1-1: Schematische weergave van een geothermiesysteem (temperaturen als voorbeeld) en het optreden van lekkage van geothermisch formatiewater (brijn) vanuit de injectieput (injector) naar het omringende grondwater en verspreiding met grondwater in de richting van een heersende achtergrondstroming. Aangepast uit Hartog (2016).

Preventiemaatregelen (bijv. Hartog, 2016. Geothermie Nederland, 2021) zijn belangrijk en dragen bij om de kans op een lekkage bij een geothermieput te minimaliseren, hoewel deze nooit nul wordt bijvoorbeeld door menselijk of technisch falen.

1.2 Afbakening onderzoek

In het hier gerapporteerde onderzoek is verkend in welke mate een eventuele brijnlekkage vanuit een geothermieput binnen het intrekgebied van een grondwaterwinning voor drinkwaterproductie, impact zou kunnen hebben op de kwaliteit van het onttrokken grondwater en van het verzamelde ruwwater, en waar deze impact van afhangt. Hiervoor zijn aan de hand van analytische berekeningen zowel de thermische als chemische impact van een eventuele lekkage op een grondwaterwinning beschouwd en voor een realistische bandbreedte onderzocht in welke mate verschillende ondergrond- en systeemcondities invloed hebben op deze impact. Twee factoren worden hierbij uitgelicht, omdat deze samenhangen met beleidsmatige keuzes: 1) de gewenste afstand/reistijd tussen een geothermieput en een grondwaterwinning en 2) de tijdsduur van de lekkage, die samenhangt met monitoring, detectie en het stoppen van de lekkage. Daarnaast zijn de resultaten van deze berekeningen gebruikt om te reflecteren op de afwegingen die gemaakt kunnen worden voor het bepalen van voorwaarden voor het eventueel toestaan van geothermie binnen NGR.

Uitgaande van bestaand beschermingsbeleid voor gerealiseerde grondwaterwinningen middels grondwaterbeschermingsgebieden is ervan uitgegaan dat een lekkende geothermieput zich op een reistijd van tenminste 25 jaar ten opzichte van een bestaande of binnen een NGR te realiseren grondwaterwinning bevindt.

2 Onderzoeksopzet

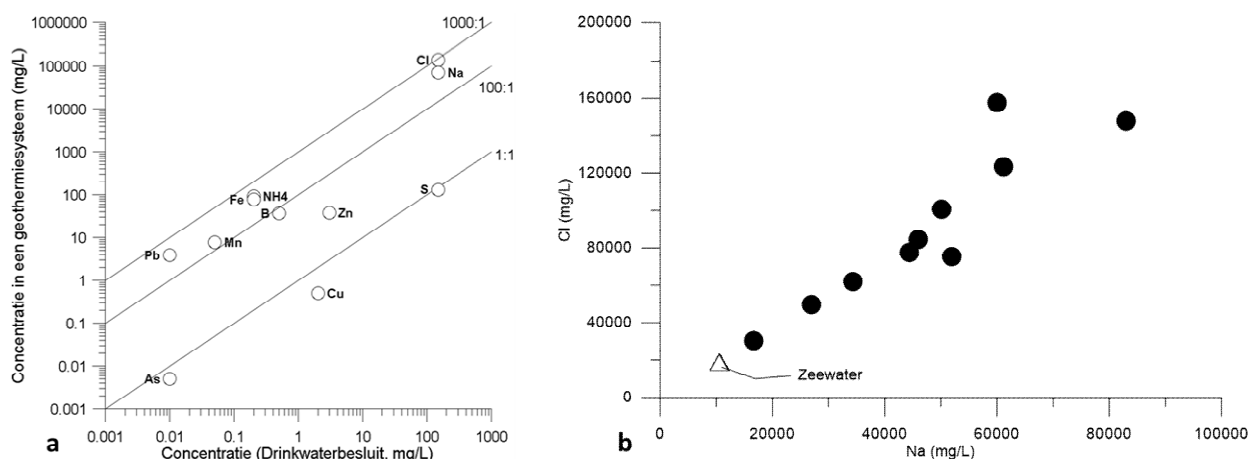
2.1 Lekkage naar grondwater

Geothermiesystemen bestaan uit één of meerdere productieputten (of producers) en één of meerdere injectieputten (of injectors). Door de productieputten wordt formatiewater van 60-90 °C met debieten van 100-400 m³/uur uit een reservoir op 2 á 3 km diepte opgepompt. Na warmtewisseling bovengronds wordt hetzelfde formatiewater, afgekoeld tot 20-50 °C, vervolgens met injectieputten weer geïnjecteerd in hetzelfde reservoir op enige afstand (~2km) van de productieputten. Lekkage van geothermisch brijn naar het grondwater is met name een risico bij injectieputten, waarbij injectiedrukken van meer dan 10-20 bar worden gehanteerd (Cirkel & Hartog, 2017; van Lopik & Hartog, 2023).

2.1.1 Samenstelling geothermisch brijn en impact op grondwaterwinning

Het geothermische brijn dat bij eventuele lekkage vanuit een geothermiesysteem in het grondwater terecht komt wijkt voor meerdere stoffen qua samenstelling sterk af van ondiep grondwater. Naar mate de concentratie van een stof hoger boven de drinkwaternorm voor die betreffende stof ligt is de potentie voor negatieve impact op een grondwaterwinning hoger. De gedetailleerde samenstelling van geothermische brijn varieert echter (bv. Hartog, 2015), onder meer andere afhankelijk van uit welk geothermisch reservoir geproduceerd wordt. Daarom zal per geothermiesysteem ook verschillen in welke mate verschillende stoffen bij een eventuele lekkage de hoogste potentie voor negatieve impact hebben. Zo zijn verschillende anorganische componenten vele malen hoger (100 - 1000x) dan de maximale concentratie toegestaan in het drinkwaterbesluit in de voorbeeld brijnsamenstelling in Figuur 2-1a. Naast de relatieve concentratie van een stof in een gelekte brijn is ook de mate waarin een stof adsorbeert of afbreekt tijdens grondwatertransport naar een onttrekkingsput van invloed op de snelheid en mate van negatieve impact op de onttrokken grondwaterkwaliteit. Stoffen in de brijn die adsorberen of afbreken zouden (veel) later, minder of helemaal niet in de onttrekkingsput terecht komen, afhankelijk van de stoffeigenschappen en locatie-specifieke variatie in ondergrondcondities (bv. organisch stof gehalte, kleigehalte en redox).

Door de hoge zoutgehalten in Nederlandse geothermische reservoirs, zo'n 2 tot 10 maal de concentratie van zeewater (Figuur 2-1b), zijn chlorideconcentraties in geothermische brijnen in Nederland structureel veel hoger dan de drinkwaternorm (bv. in Figuur 2-1a). Verder zorgt het conservatieve transport (geen adsorptie of afbraak) van chloride tijdens grondwatertransport ervoor dat deze het sterkst en snelst zou doorbreken in een grondwateronttrekkingsput. Voor de generieke verkenning van de mogelijke impact van een lekkage op een grondwaterwinning is in dit onderzoek daarom uitgegaan van de range aan chlorideconcentraties in geothermische brijnen in Nederland (Figuur 2-1b), waarmee stoffen gepresenteerd worden die met een tot ongeveer 1000 keer hogere concentratie dan de drinkwaternorm in de brijn voorkomen. Daarnaast is voor het beschouwen van de thermische impact van een eventuele brijnlekkage in eerste instantie uit gegaan van een realistische brijntemperatuur van 50 °C (representatief voor de maximale brijntemperatuur bij lekkage uit de injectieput van een geothermiesysteem).



Figuur 2-1: a) Voorbeeld van brijnsamenstelling voor een geothermiesysteem in Nederland op basis van concentratie van verschillende anorganische componenten en b) de natrium en chlorideconcentraties in het brijn van verschillende geothermiesystemen in Nederland. Beide figuren overgenomen uit Hartog (2016).

2.1.2 Lekdebiet

In eerdere onderzoeken (Cirkel & Hartog, 2017; van Lopik & Hartog, 2023) zijn voor de mogelijke lekkage van geothermisch brijn is een bandbreedte van mogelijke lekdebieten beschouwd, op basis van de methode opgesteld door Maas (2010). De in deze studies beschouwde lekkagedebieten varieerden tussen 1 en 50 m³/dag. Ter illustratie, een lekkagedebiet van 1-50 m³/dag komt overeen met ca. 0,02-1% van het injectiedebiet van een geothermieput die produceert met 200 m³/uur.

2.2 Transport naar grondwaterwinning

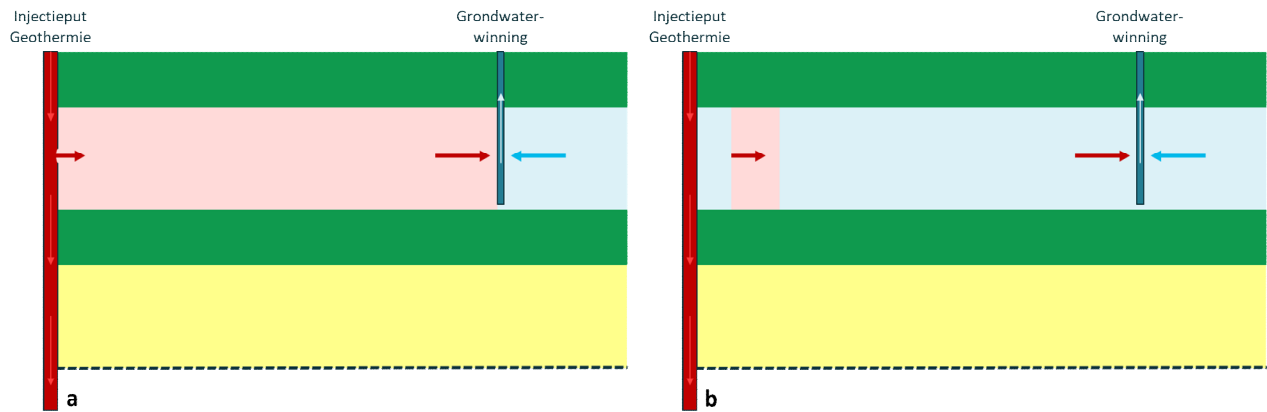
Voor het doel van dit onderzoek is een generieke situatie beschouwd waarin vanuit een geothermieput brijn lekt naar grondwater dat richting een actieve grondwaterwinning stroomt. Voor de indicatieve verkenning van de potentiële impact van een eventuele brijnlekkage is in dit onderzoek aangenomen dat de lekkage in een gespannen watervoerend pakket plaatsvindt. Onderzocht is op welke wijze verschillende factoren van invloed zijn op de snelheid en mate waarin deze lekkage impact heeft op het onttrokken grondwater. Voor deze verkennende berekeningen is aan de hand van eendimensionale analytische methoden doorgerekend wat de effecten van de brijnlekkage op de grondwaterwinning zijn. Hierbij zijn twee scenario's beschouwd:

- 1 Een continue oneindige lekkage van brijn uit de geothermieput (Figuur 2-2a);
- 2 Een tijdelijke lekkage die na verloop van tijd stopt door bijvoorbeeld reparatie van de lekkage of het uitschakelen van de geothermieput (Figuur 2-2b).

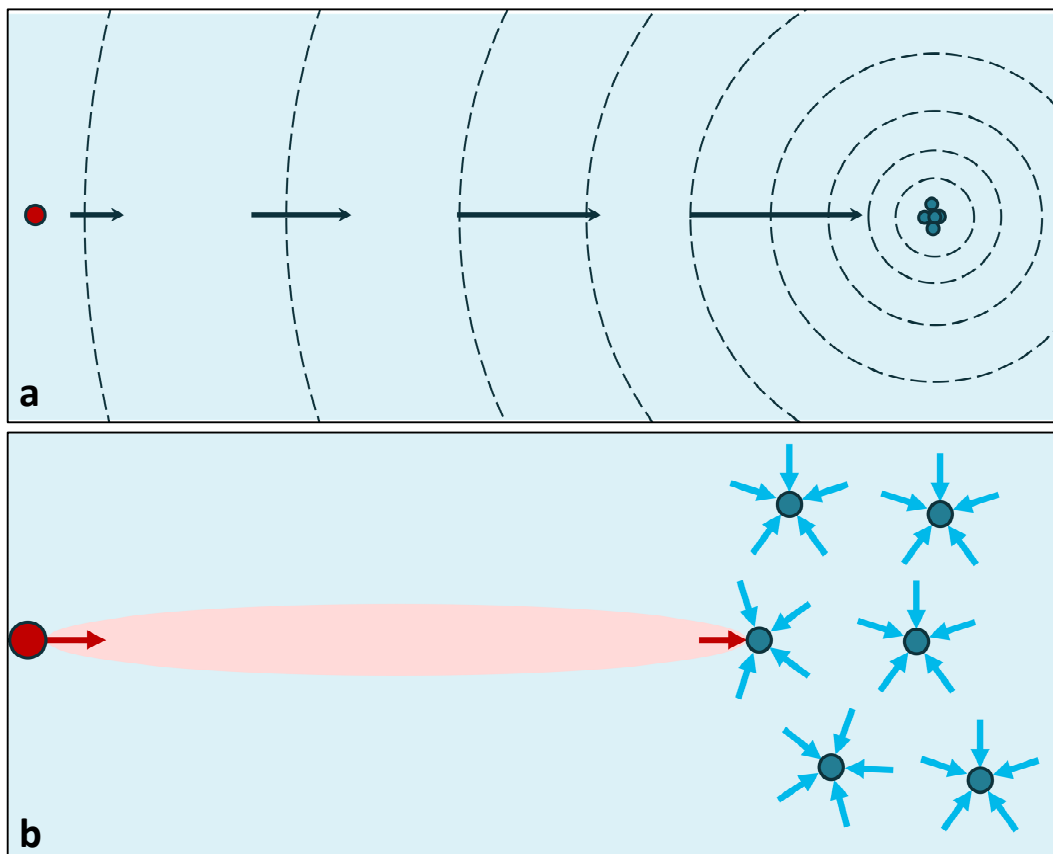
Voor het berekenen van het transport van de geothermieput naar de grondwaterwinning zijn de volgende aannames gehanteerd:

- De lekkage en de grondwaterwinning bevinden zich in hetzelfde zoete, volledig afgesloten watervoerend pakket met alleen horizontale stroming.
- De grondwaterwinning bestaat uit meerdere volkomen onttrekkingsputten waarvoor een (gemiddeld) gelijk en continue onttrekkingsdebiet wordt aangenomen.
- Grondwaterstroming wordt enkel veroorzaakt door de winning, die voor een radiaal stromingsveld richting de onttrekkingsputten zorgen (Figuur 2-2a). De invloed van de lekkage op grondwaterstroming is als verwaarloosbaar beschouwd vanwege de geringe grootte (ordegrootte 0,1-1 m³/uur) ten opzichte van een grondwaterwinning (100-1000 m³/uur). Het stromingspatroon richting de winning is radiaal symmetrisch, dus zonder invloed van bv. andere grondwatergebruikers. Ook voor de individuele put binnen het puttenveld is radiaal symmetrische toestroming aangenomen.

- Transport vindt plaats door advectie en longitudinale dispersie, voor warmte aangevuld met geleiding en retardatie (door opname van warmte in de korrelmatrix van het watervoerende pakket). Deze transportprocessen vinden enkel plaats in de stromingsrichting. Hierbij is de invloed van aanvullende vermenging loodrecht op de stromingsrichting door transversale (horizontaal) en verticale dispersie niet meegenomen.



Figuur 2-2: Transport van een injectieput van een geothermiesysteem naar een grondwaterwinning voor een a) continue lekkage en b) tijdelijke lekkage.



Figuur 2-3: Schematisch weergave van a) de stroming veroorzaakt door de grondwaterwinning en b) het transport vanuit een geothermieput naar een grondwaterwinning bij een continue lekkage.

2.3 Bereiken van grondwaterwinning

Het gelekte brijn wordt door de grondwaterstroming getransporteerd langs de stroombaan en uiteindelijk onttrokken door de put van de grondwaterwinning waar deze stroombaan in terecht komt (Figuur 2-3a). De stroombaan met het gelekte brijn komt terecht in een van de onttrekkingsputten van de grondwaterwinning, gewoonlijk de put die op de kortste afstand van de geothermieput staat (Figuur 2-3b). Uitgaande van een stationaire situatie, komt alle gelekte brijn dus terecht in 1 enkele onttrekkingsput. In deze ‘getroffen’ onttrekkingsput wordt het grondwater in de stroombaan met brijn vermengd met het omringend aangetrokken ‘schone’ grondwater (Figuur 2-3b). Uit de mengverhouding tussen het grondwater vervuild met brijn en het schone grondwater volgt de resulterende chlorideconcentratie en temperatuur in deze put. De verdere en maximale vermenging die kan optreden is als het ruwwater uit de door brijn ‘getroffen’ onttrekkingsput wordt vermengd met het door de overige putten onttrokken grondwater. Hieruit volgt de chlorideconcentratie/temperatuur in het totale ruwwater van de winning. Hierbij is aangenomen dat reistijdverschillen tussen de putten onderling verwaarloosbaar zijn en dat iedere onttrekkingsput, en dus ook de onttrekkingsput waarin het brijn terecht komt, in het midden van het radiale stromingsveld staat (Figuur 2-3a).

2.4 Opzet en aannames

De impact van een brijnlekkage op een grondwaterwinning is op drie manieren onderzocht. Bij de eerste wordt de maximaal mogelijke impact bepaald en gaat uit van de mengverhouding van de lek- en onttrekkingsdebieten, is onafhankelijk van de reisafstand en gaat uit van continue lekkage. Met de twee andere manieren is de doorbraak in de winning beschouwd op basis van analytische benaderingen waarbij wel de invloed van reisafstand en duur van lekkage op de impact is meegenomen. Dit is gedaan voor zowel een continue als een tijdelijke lekkage. In deze paragraaf worden de drie soorten berekeningen kort toegelicht; verdere details zijn opgenomen in Bijlage I. De resultaten van deze berekeningen volgen in Hoofdstuk 3.

2.4.1 Continue lekkage: mengverhouding

Bij een continue lekkage, waarbij het lekdebiet en -concentratie constant blijft, zal de onttrokken concentratie voor iedere stof, zolang deze niet afgebroken wordt, uit het brijn na doorbraak in de onttrekkingsput toenemen totdat deze constant wordt. Het optreden van retardatie, zoals ook voor warmte, vertraagd slechts die doorbraak. Bij het bereiken van deze maximale concentratie of temperatuur is de massa van een stof of de hoeveelheid warmte die per tijd lekt gelijk aan de hoeveelheid die door de winning per tijd wordt onttrokken. Die maximale concentratie volgt uit een simpele balansberekening, waarbij de concentratie van een stof en de temperatuur in het onttrokken water bepaald wordt door de mate van menging van onttrokken grondwater met en zonder brijn. De gehanteerde massabalans is in meer detail beschreven in Bijlage I.I.

2.4.2 Continue lekkage: doorbraak

De mengconcentratie beschreven in de vorige paragraaf wordt bereikt na volledige doorbraak van het brijn in de grondwaterwinning. Deze doorbraak naar maximale concentratie is niet instantaan maar zal geleidelijk bereikt worden doordat stoffen uit de eerst gelekte brijn tijdens de stroming richting de winning sterker gemengd raken met grondwater (door longitudinale dispersie). De resulterende doorbraakcurve is beschouwd aan de hand van de analytische vergelijking zoals beschreven door Gelhar & Collins (1971), zoals verder uitgewerkt in Bijlage I.II.

2.4.3 Tijdelijke lekkage: doorbraak

Voor het geval waar een lekkage na een bepaalde periode stopt, bijvoorbeeld na detectie en herstel, is de invloed van de duur van de tijdelijke lekkage beschouwd. Hierbij is aangenomen dat het lek gedurende die tijdsperiode een constant lekdebiet en -samenstelling heeft. Het verschil met de doorbraak bij continue lekkage in de vorige paragraaf is dat er nu ook vermenging door longitudinale dispersie aan de staart van de pluim (het laatst gelekte brijn) plaatsvindt. De analytische oplossing voor transport van een dergelijke lekkagepuls is gegeven in de

handleiding van het programma CXTFIT (Toride et al., 1999). Een gedetailleerde uitwerking van de berekeningen onder deze condities is gegeven in Bijlage I.III.

2.4.4 Beschouwde basiscondities

De resultaten van de hierboven beschreven drie soorten berekeningen (maximale impact bij continue lekkage, doorbraak bij continue lekkage en doorbraak bij tijdelijke lekkage) zijn in eerste instantie vergeleken voor een range aan reistijden van lekkagepunt tot grondwateronttrekking (25, 30, 35 en 40 jaar). Daarbij zijn in eerste instantie realistische waarden voor de overige parameters als basiscondities aangenomen (Tabel 2-1). Vervolgens is de gevoeligheid van de resultaten voor de waarde van deze basiscondities getoetst.

Tabel 2-1. Aangenomen basiscondities voor de berekening van de impact van een mogelijke brijnlekkage op de waterkwaliteit bij een grondwaterwinning, benodigd voor de gebruikte drie soorten berekeningen 1: de mengverhouding bij continue lekkage, 2: de doorbraak bij een continue lekkage, 3: de doorbraak bij een tijdelijke lekkage.

Parameter	Aangenomen waarde	Benodigd voor berekening
Reistijd geothermieput-winning	25, 30, 35 en 40 jaar	2,3
Lekkageduur	10 tot 3650 dagen	3
Lekkagedebiet	10 m ³ /dag	1,2,3
Lekconcentratie	100 g Cl/l = 100.000 mg Cl/l ¹	1,2,3
Lektemperatuur	50 °C	1,2,3
Winvolume grondwaterwinning	5 miljoen m ³ /jaar	1,2,3
Aantal onttrekkingsputten	10	1,2,3
Winvolume per onttrekkingsput	0,5 miljoen m ³ /jaar	1,2,3
Achtergrondconcentratie	0,02 g Cl/l = 20 mg Cl/l	1,2,3
Achtergrondtemperatuur	12 °C	1,2,3
Dikte watervoerend pakket*	20 meter	2,3
Porositeit watervoerend pakket	0,3	2,3
Longitudinale dispersiviteit	2,0 m	2,3

¹Overeenkomstig met een 666 keer overschrijding van de drinkwaternorm voor chloride (150 mg/l)

*Omdat het effect van longitudinale dispersie bij berekeningen 2 en 3 afhangt van de reisafstand is het voor een gegeven reistijd en onttrekkingsdebet nodig een aanname te doen voor de aquiferdikte (zie bijvoorbeeld toelichting op vergelijking 7 in Bijlage I.II.). De berekeningen zijn onafhankelijk van op welke diepte of over welke lengte de lekkage plaatsvindt.

3 Resultaten

3.1 Continue lekkage: mengverhouding

Uit de massabalans resulteert een chlorideconcentratie van 750 mg/l in de getroffen onttrekkingsput en 92 mg/l in het verzamelde ruwwater (Tabel 3-1). Door de menging in de put met grondwater met een achtergrondconcentratie chloride (20 mg/l) is de chlorideconcentratie voor het gebruikte voorbeeld in de onttrekkingsput dus meer dan 100x kleiner dan de concentratie in de lekkende brijn (100.000 mg/l) en in het ruwwater dus meer dan 1000x kleiner. Voor de condities van dit rekenvoorbeeld overschrijdt de concentratie in het onttrokken grondwater de drinkwaternorm van 150 mg/l, maar niet in het verzamelde ruwwater.

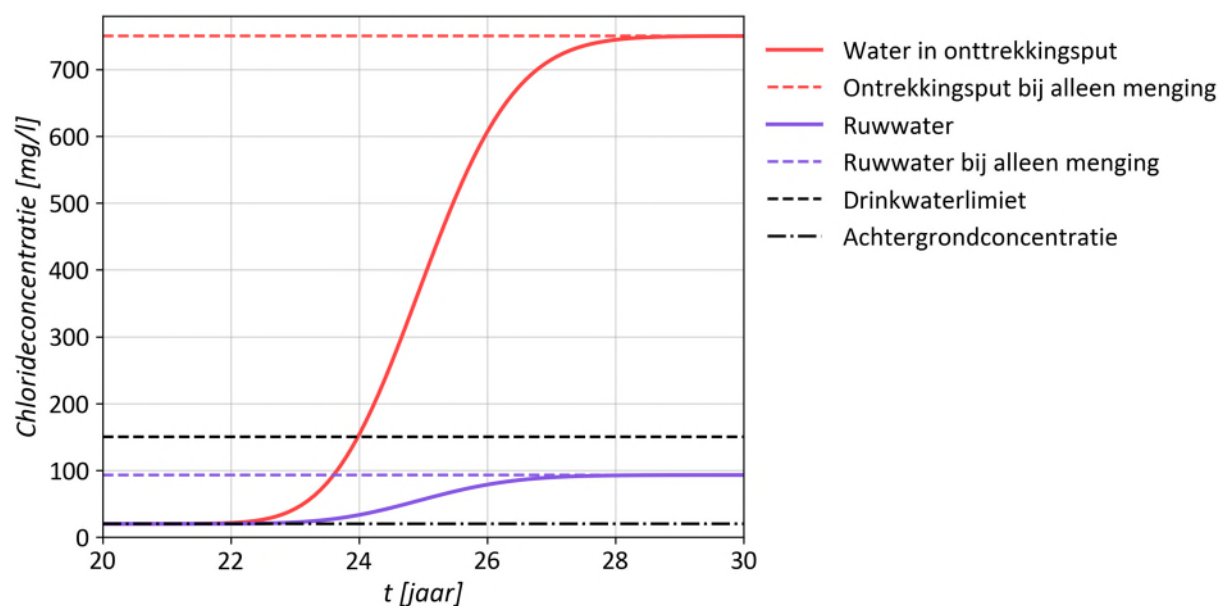
Tabel 3-1. Chlorideconcentratie en temperatuur in de getroffen winput en het ruwwater in de evenwichtssituatie bij continue lekkage onder de voorbeeldcondities in Tabel 2-1.

	Chlorideconcentratie (mg/l)	Temperatuur (°C)
Getroffen put	750	12,28
Verzameld ruwwater	92	12,03

Anders dan voor de chlorideconcentratie, is door het relatief kleine verschil tussen de temperatuur van het gelekte brijn (50°C) en de achtergrond grondwatertemperatuur (12°C) de thermische impact door de brijnlekkage op de grondwaterwinning ook veel kleiner. Het berekende thermische effect in de getroffen onttrekkingsput is een verhoging van 12,00 °C naar 12,28 °C voor het onttrokken grondwateren naar 12,03 °C in het ruwwater. Vanwege de geringe thermische effecten, is verder analyse van de thermische impact buiten beschouwing gelaten bij de verdere berekeningen.

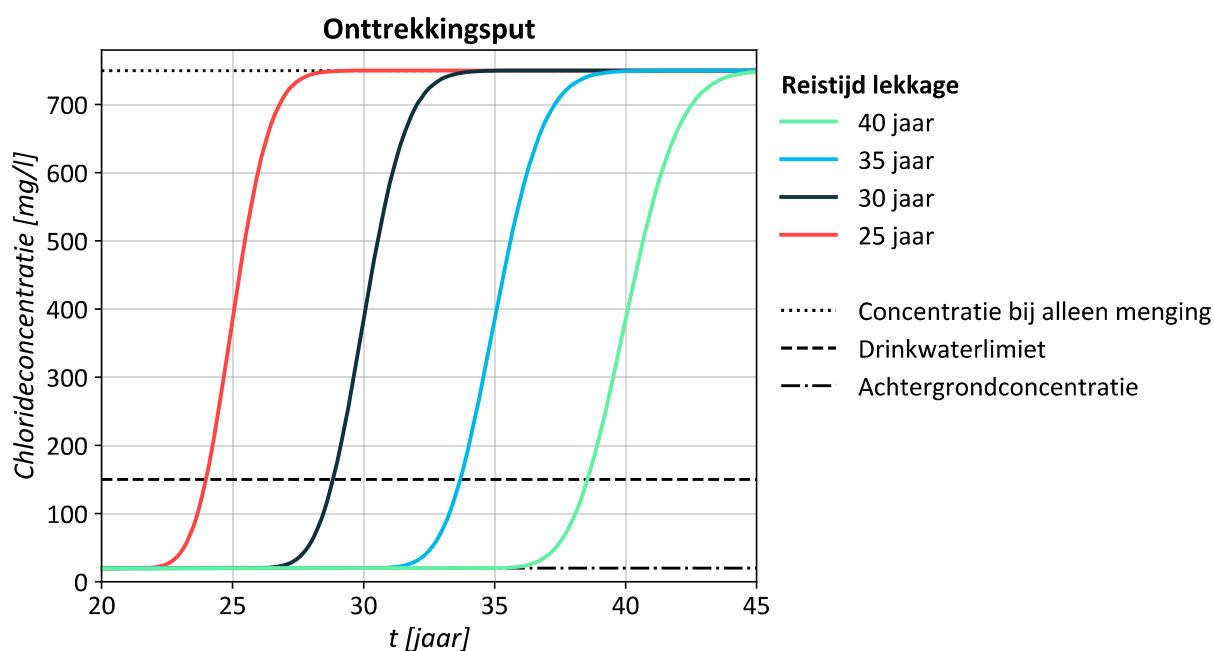
3.2 Continue lekkage: doorbraak

Voor een reistijd van 25 jaar voor de beschouwde basiscondities (Tabel 2-1) start de berekende doorbraak van chloride na ca. 22 jaar (Figuur 3-1), 3 jaar eerder dan de gemiddelde reistijd van 25 jaar vanaf de geothermieput vanwege het optreden van dispersie. Hierdoor mengt het chloride uit de brijnlekkage met het 'voorliggende' grondwater, waardoor een deel van de pluim sneller gaat dan de gemiddelde grondwatersnelheid en dus eerder bij de grondwaterwinning aankomt. Onder de hier beschouwde condities werd hierdoor ook de drinkwaternorm al eerder overschreden, na 24 jaar. De maximale concentratie wordt wat later bereikt, na 28 jaar, en is gelijk aan de concentratie (750 mg/l in dit voorbeeld) zoals berekend voor enkel menging (Paragraaf 3.1).



Figuur 3-1: Doorbraakcurve van chloride bij constante lekkage en een gemiddelde reistijd van 25 jaar onder de voorbeeldcondities in Tabel 2-1.

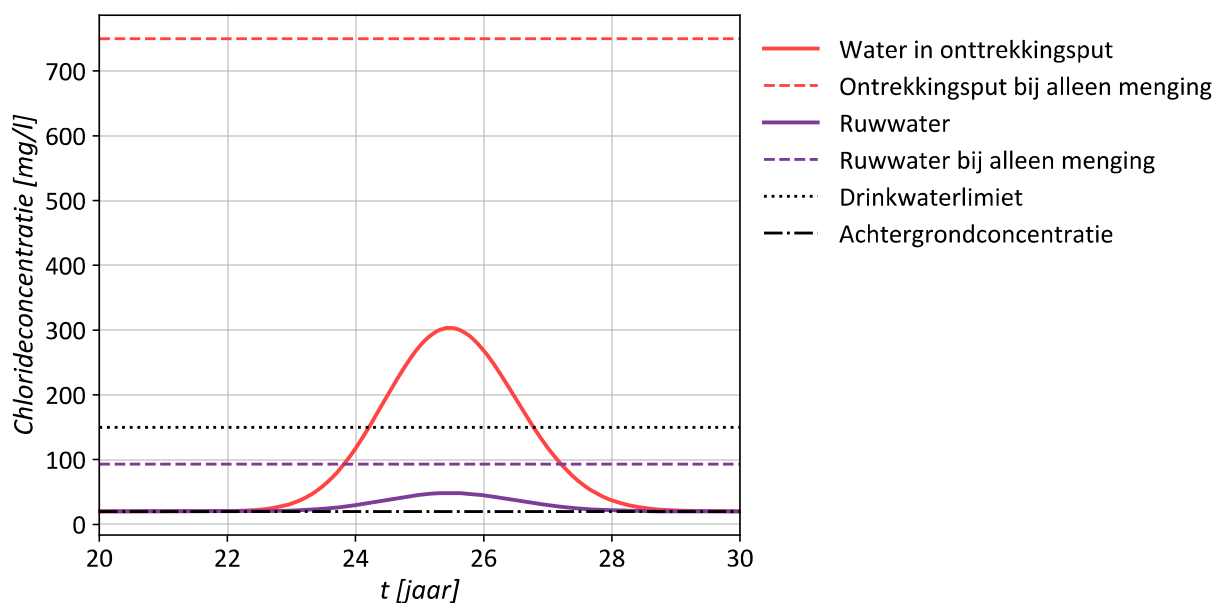
De resultaten geven aan dat bij een continue lekkage de chlorideconcentratie na verloop van tijd altijd naar dezelfde maximale concentratie toe gaat, ongeacht de gemiddelde reistijd (Figuur 3-2). Naast dat een langere reistijd logischerwijs zorgt voor het navenant later doorbreken zorgt de bijbehorende langere reisafstand (bij gelijk blijven van de overige condities) er voor dat er iets meer menging door dispersie optreedt, waardoor de doorbraakcurves wat minder steil worden. Bij de gebruikte voorbeeldcondities zorgt dit er enerzijds voor dat de eerste doorbraak wat sneller plaatsvindt t.o.v. de gemiddelde reistijd (ca. 5 jaar eerder voor 40 jaar t.o.v. 3 jaar eerder voor 25 jaar) en anderzijds dat het dezelfde tijd langer duurt voordat de maximumconcentratie wordt bereikt. Omdat met deze analytische berekeningen alleen rekening gehouden kon worden met de vermenging die optreedt in de stromingsrichting (longitudinale dispersie) zou de vermenging tijdens grondwatertransport naar de winning nog wat sterker worden door de in werkelijkheid ook aanwezige dispersie (verticaal en transversaal) loodrecht op de stromingsrichting. Hierdoor kan de doorbraak vertraagd en verder uitgesmeerd raken, al is de verwachting dat met genoeg tijd ook dan de doorbraak naar dezelfde maximale concentratie zal gaan omdat ook de stroombanen waarnaar de transversale en longitudinale dispersie optreedt allen in dezelfde onttrekking zullen eindigen.



Figuur 3-2: Doorbraakcurve voor de chlorideconcentratie in de getroffen onttrekkingsput voor verschillende gemiddelde reistijden.

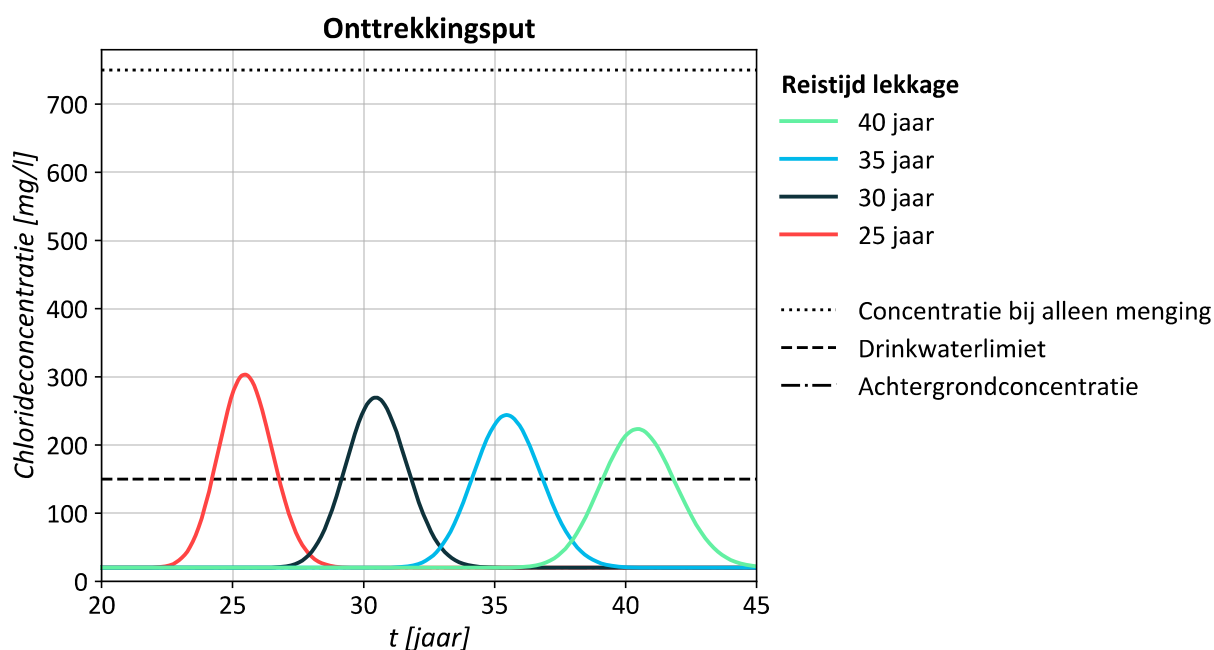
3.3 Tijdelijke lekkage: doorbraak

Onder de gehanteerde basiscondities wordt bij de aangenomen lekkageduur van 1 jaar de piekconcentratie in de grondwaterwinning meer dan gehalveerd (Figuur 3-3) ten opzichte van de maximale mengconcentratie die bereikt wordt bij een continue lekkage (Figuur 3-2). Door dispersie wordt de puls tijdens transport van de geothermieput naar de grondwaterwinning uitgesmeerd, zowel aan de voorkant als aan de achterkant van de puls (Figuur 3-3). In dit voorbeeld met een tijdelijke lekkage zorgt een lekkageduur van 1 jaar gedurende 6 jaar voor een verhoging van de chlorideconcentratie in de getroffen onttrekkingsput en een overschrijding van de drinkwaternorm gedurende ca. 2,5 jaar.



Figuur 3-3: Doorbraakcurve van chloride bij een tijdelijke lekkage van 1 jaar en een gemiddelde reistijd van 25 jaar onder de voorbeeldcondities in Tabel 2-1.

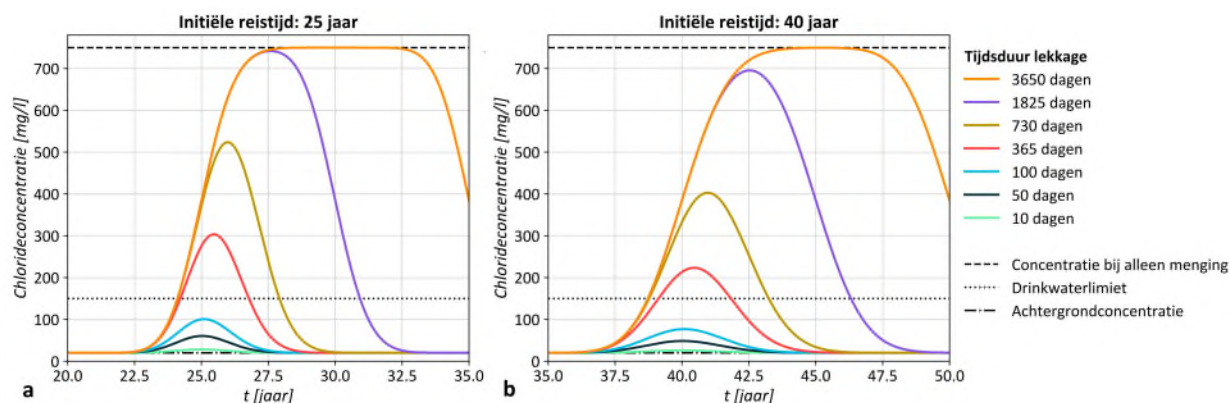
Bij een tijdelijke lekkage, zorgt een langere gemiddelde reistijd er onder de basiscondities voor dat de piekconcentratie in de put afneemt (Figuur 3-4). Een toename van de gemiddelde reistijd van 25 naar 40 jaar zorgt voor een afname van de piekconcentratie van 303 naar 224 mg/l, veroorzaakt door grotere uitsmering als gevolg van de grotere vermenging (door longitudinale dispersie) over de langere reisafstand. Hierdoor neemt de tijdsduur dat verhoogde chlorideconcentraties worden onttrokken wel toe van ca. 8 jaar voor een gemiddelde reistijd van 25 jaar naar ca. 11 jaar voor 40 jaar. Onder de hier gehanteerde condities wordt de drinkwaternorm in de getroffen onttrekkingsput voor iedere gemiddelde reistijd ca. 2,5 jaar overschreden.



Figuur 3-4: Doorbraakcurve van chloride in de getroffen onttrekkingsput bij een tijdelijke lekkage van 1 jaar en verschillende gemiddelde reistijden.

De lekkageduur heeft grote invloed op zowel de piekconcentratie in het door de getroffen put onttrokken grondwater (en dus in het ruwwater van de winning), als op de lengte van tijdsperiode waarin verhoogde chlorideconcentraties optreden (Figuur 3-5). Onder de aangenomen basiscondities zorgt een lekkageduur van meer dan 5 jaar (1825 dagen) ervoor dat de piekconcentratie nagenoeg gelijk is aan de maximale concentratie op basis van menging van het lekdebiet met het onttrekkingsdebiet (Paragraaf 3.1). Terwijl voor lekkageduren van 100 dagen en minder zelfs de drinkwaternorm niet wordt overschreden.

Een langere gemiddelde reistijd zorgt ervoor dat de piekconcentratie bij alle lekkageduren nog wat verder afneemt (vergelijk Figuur 3-5a met Figuur 3-5b). Dit is echter niet het geval wanneer de maximale mengconcentratie voor beide gemiddelde reistijden bereikt wordt, zoals onder de aangenomen condities het geval is bij een lekkageduur van 10 jaar (3650 dagen). Daarnaast heeft een langere gemiddelde reistijd weinig effect op de tijdsperiode waarbinnen de drinkwaternorm wordt overschreden.



Figuur 3-5: Doorbraakcurve van chloride in de getroffen onttrekkingsput voor verschillende lekkagetijden voor een gemiddelde reistijd van a) 25 jaar en b) 40 jaar.

3.4 Invloed en interactie verschillende factoren

Op basis van de indicatieve analytische berekeningen in de voorgaande paragrafen is beschreven wat de invloed en interactie is van reistijd en lekkageduur op de impact voor een grondwater onttrekking. Hierbij zijn de overige realistisch gekozen waarden voor de parameters in de basiscondities (Tabel 2-1) constant gehouden. Om de invloed van deze overige parameters te toetsen is aan de hand van realistische minimale en maximale waarden voor deze parameters (Tabel 3-2) de piekconcentratie chloride doorgerekend in de getroffen onttrekkingsput (Tabel 3-3) en het ruwwater (Tabel 3-4). Dit is gedaan voor zowel een continue lekkage als een tijdelijke lekkage. Bij de berekeningen is enkel de benoemde parameter gevarieerd terwijl voor de overige parameters de waarden van de basiscondities werden gehanteerd (Tabel 2-1).

Tabel 3-2. Minimale en maximale realistisch geachte waarden gehanteerd om de invloed van verschillende parameters te beschouwen.

Parameter	Min	Basis	Max
Gemiddelde reistijd [jaar]	-	25	100
Lekkageduur [dag]	10*	365	3650
Lekconcentratie [g Cl/l] ¹	30	100	200
Lekdebiet [m ³ /dag]	1*	10	50
Winvolume [miljoen m ³ /jaar]	0,5	5	20
Aantal onttrekkingsputten [-]	-	10	20
Dikte watervoerend pakket [m]	10	20	100
Longitudinale dispersiviteit [m]	0,5	2	10

¹Min, basis en max overeenkomstig met een 200, 666 en 1333 keer overschrijding van de drinkwaternorm voor chloride (150 mg/l)

*Voor de berekening is 1 m³/dag aangenomen als detecteerbare lekkage. Voor het geval dat er geen lekkage optreedt zou het "lekdebiet" logischerwijs gelijk aan nul zijn.

Uit de resultaten van de aanvullende analytische berekeningen van de maximale chlorideconcentratie bij doorbraak in de getroffen onttrekkingsput (Tabel 3-3) blijkt dat in het geval van continue lekkage de drinkwaternorm wordt overschreden, ook onder de geteste relatief gunstige condities. De meest negatieve impact van alle geteste condities werd berekend voor de getroffen put van een winning met een relatief laag winvolume onttrekkingsdebiet waar de drinkwaternorm bijna 50 maal wordt overschreden (7913 mg/l). Alleen voor de conditie met een relatief laag lekdebiet (1 m³/dag) blijft de doorbraak door voldoende verdunning in de put nog wel onder de drinkwaternorm (150 mg/l), al breekt er wel een verhoogde chlorideconcentratie (93 mg/l) door. Voor de berekeningen bij tijdelijke lekkage zijn de doorbraakconcentraties aanzienlijk lager en wordt in vijf van de geteste condities de drinkwaternorm niet overschreden. Van alle geteste condities is de berekende impact van een brijnlekage op de onttrokken waterkwaliteit het kleinst bij de kortst geteste lekkageduur (10 dagen).

Tabel 3-3. Chlorideconcentratie **in de getroffen onttrekkingsput** voor de minimale en maximale realistisch geachte waarde voor verschillende parameters. Hierbij is enkel de aangegeven parameter gevarieerd, voor de overige parameters geldt de basiswaarde (Tabel 3-2). Graduele kleurindicatie voor impact: achtergrondconcentratie 20 mg/L: groen, tot drinkwaternorm van 150 mg/L: geel, tot hoogst bepaalde doorbraak van 7319 mg/L: rood.

Chlorideconcentratie Onttrekkingsput (mg/l)	Continue lekkage Basis: 750		Tijdelijke lekkage Basis: 303	
	Min	Max	Min	Max
Gemiddelde reistijd	-	750	-	51
Lekkageduur	n.v.t.	n.v.t.	28	750
Lekconcentratie	239	1480	105	587
Lekdebiet	93*	3669	48*	1437
Winvolume	7319	202	1663	116
Aantal onttrekkingsputten	-	1480	-	587
Dikte watervoerend pakket	750	750	351	214
Longitudinale dispersiviteit	750	750	524	152

*Voor de berekening is 1 m³/dag aangenomen als detecteerbare lekkage. Voor het geval dat er geen lekkage optreedt zou het "lekdebiet" logischerwijs gelijk aan nul zijn.

Tabel 3-4. Chlorideconcentratie **in verzameld ruwwater** voor de minimale en maximale realistisch geachte waarde voor verschillende parameters. Hierbij is enkel de aangegeven parameter gevarieerd, voor de overige parameters geldt de basiswaarde (Tabel 3-2). Graduele kleurindicatie voor impact: achtergrondconcentratie 20 mg/L: groen tot drinkwaternorm van 150 mg/L: geel tot hoogst bepaalde doorbraak van 7319 mg/L: rood.

Chlorideconcentratie Ruwwater (mg/l)	Continue lekkage Basis: 93		Tijdelijke lekkage Basis: 48	
	Min	Max	Min	Max
Gemiddelde reistijd	93	93	-	23
Lekkageduur	n.v.t.	n.v.t.	21	93
Lekconcentratie	42	166	29	77
Lekdebiet	27*	385	23*	162
Winvolume	750	38	184	30
Aantal onttrekkingsputten	-	93	-	48
Dikte watervoerend pakket	93	93	53	39
Longitudinale dispersiviteit	93	93	70	33

*Voor de berekening is 1 m³/dag aangenomen als detecteerbare lekkage. Voor het geval dat er geen lekkage optreedt zou het "lekdebiet" logischerwijs gelijk aan nul zijn.

Ondanks de verdere verdunning van de chloride doorbraak in de getroffen onttrekkingsput, wordt bij continue lekkage voor drie van de geteste condities de drinkwaternorm ook overschreden in het verzameld ruwwater (Tabel 3-4). Bij tijdelijke lekkage wordt voor alleen nog voor de geteste conditie van een klein winvolume en het hoge lekdebiet nog een (kleine) overschrijding van de drinkwaternorm berekend.

4 Discussie

4.1 Brijnsamenstelling en de impact van lekkage op grondwaterwinningen

Bij eventuele brijnlekkage beïnvloedt de samenstelling van een geothermische brijn de potentie voor negatieve impact (overschrijding van drinkwaternormen) op een grondwaterwinning. Naar mate de concentratie van een bepaalde stof in de brijn de drinkwaternorm meer overschrijdt wordt de potentiële negatieve impact groter. De stof in de brijn die deze het meest overschrijdt heeft daarmee de sterkste potentie tot negatieve impact bij de winning. Voor de generieke verkenning in dit onderzoek is er voor gekozen om chloride als indicatiestof te nemen omdat chlorideconcentraties in alle bekende Nederlandse geothermische brijnen ruim (200-1000 keer) boven de drinkwaternorm uit komen. Bij deze hoge mate van overschrijding is bij menging met grondwater de invloed van de achtergrondconcentratie in grondwater (zoals voor chloride aangenomen als 20 mg/l) niet relevant. Ook ondervindt chloride geen afbraak of adsorptie tijdens het grondwater transport (conservatief) richting de grondwateronttrekking waardoor de impact op de onttrokken grondwaterkwaliteit relatief snel en sterk zal zijn. Hoewel de range aan chlorideconcentraties in geothermische brijnen als uitgangspunt zijn gebruikt in dit onderzoek zijn de verkregen inzichten net zo relevant voor andere stoffen in brijnen. Voor stoffen met een vergelijkbare overschrijding van de drinkwaternorm (bv. Figuur 2-1a) zou voor de verschillende onderzochte condities een vergelijkbare mate van negatieve impact optreden. Stoffen met een eventueel hogere mate van drinkwaternormoverschrijding in de brijn zouden een navenant grotere impact hebben en vice versa voor stoffen met een lagere mate van drinkwaternormoverschrijding. Stoffen die tijdens sterk retarderen tijdens grondwater transport, (zoals bv zware metalen) of afbreken (bepaalde organische verbindingen) zullen een grondwaterwinning veel later, met gereduceerde concentraties of mogelijk helemaal niet bereiken. De niet-conservatieve stoffen die, bij doorgaande onttrekking, de winning nog wel bereiken zouden tot overschrijding van drinkwaternormen kunnen leiden, lang nadat de eerste doorbraak van chloride (en andere conservatieve stoffen) heeft plaatsgevonden.

4.2 Belang van korte lekkageduur en lekdetectie voor beperken impact op winningen

De resultaten van de analytische voorbeeldberekeningen lieten zien dat zelfs relatief kleine brijnlekages ten opzichte van het debiet van een geothermiesysteem al kunnen leiden tot een negatieve impact op de onttrokken grondwaterkwaliteit, met concentraties boven de drinkwaternorm voor de getroffen onttrekkingsput het onttrokken grondwater als ook het verzamelde ruwwater van een winning. Voor de in dit onderzoek beschouwde ruime reisafstanden (>25 jaar) van lekkage tot winning treedt deze impact onverminderd op bij grotere reisafstand, binnen het intrekgebied. Een grotere reisafstand zorgt er alleen voor dat het langer duurt voordat de impact zich manifesteert bij een winning, waardoor er meer tijd zou zijn om maatregelen te kunnen nemen, op voorwaarde dat de lekkage op tijd gedetecteerd wordt.

Als preventiemaatregelen een lekkage niet hebben kunnen voorkomen, dan is lekkageduur de meest bepalende factor voor de impact op de grondwaterkwaliteit in een onttrekkingsput (Tabel 3-3) en dat van het verzameld ruwwater voor een gehele winning (Tabel 3-4). Als de lekkageduur voldoende kort is dan werkt een langere reistijd verlagend op de maximaal onttrokken concentratie (Figuur 3-5). Als we de levensduur van een geothermiesysteem, 20-30 jaar of langer, als de langst mogelijke onopgemerkte lekkageduur beschouwen dan kan deze tot sterke negatieve impact leiden, zoals de voorbeeldberekeningen in deze studie lieten zien voor lekkageduren van bv. 10 jaar (Figuur 3-5). De voorbeeldberekeningen geven aan dat, om negatieve impact op een bestaande grondwaterwinning te kunnen voorkomen, lekkages relatief snel, binnen enkele maanden (Figuur 3-5), gedetecteerd en verholpen zouden dienen te worden, ook voor geothermiesystemen die zich wel buiten de bestaande grondwaterbeschermings-, maar nog wel in de intrekgebieden bevinden. Vanwege deze benodigde relatief snelle detectie, dient ook de detectielocatie zich op relatief korte afstand van het lek te bevinden. Snelle

lekdetectie kan, in geval van progressieve lekontwikkeling door bijvoorbeeld corrosie, ook bijdragen aan het beperkt houden van het lekdebiet, een andere belangrijke factor voor het beperken van de negatieve impact op een winning.

Terwijl er, ook vanuit de geothermiesector (Geothermie Nederland, 2021), terecht aandacht is voor maatregelen om brijnlekages helpen voorkomen, is het in de praktijk onduidelijk hoe snel en vanaf welk lekdebiet een onverhoopt lek zou kunnen worden vastgesteld. Wel geeft recent modelonderzoek (van Lopik & Hartog, 2023) aan dat met grondwatermonitoring op relatief korte afstand ($< \sim 10\text{m}$) van een geothermieput een eventuele brijnlekkage, ook relatief kleine, binnen enkele weken tot enkele maanden, afhankelijk van de condities, gedetecteerd zou kunnen worden. Snelle detectie zou ook een relatief snelle mitigatie mogelijk kunnen maken die verder transport naar een grondwaterwinning voorkomen zou kunnen voorkomen (Cirkel & Hartog, 2017; Hartog et al., 2020; van Lopik & Hartog, 2023).

4.3 Geothermie in NGR-gebieden

Anders dan bij bestaande grondwaterwinningen voor drinkwaterproductie bestaan er voor mogelijke toekomstige winningen in Nationale Grondwaterreserves (NGR) nog geen grondwaterbeschermingsgebieden. Uitgaande van bestaand beleid dat geothermiesystemen uitsluit in grondwaterbeschermingsgebieden zou elke realisatie van een geothermiesysteem in een NGR-gebied een ruimtebeslag betekenen waarbinnen het voor drinkwaterbedrijven ongewenst zou zijn om een grondwaterwinning te realiseren. Met een toenemend aantal geothermiesystemen binnen NGR-gebied zouden voorkeurslocaties voor winningen steeds minder realiseerbaar kunnen worden. Ook als bestaande geothermiesystemen buiten het grondwaterbeschermingsgebied van de nieuwe winning gehouden kunnen worden, dan kan het met brijn verontreinigde grondwater door een eventueel (al) lekkende geothermieput in het intrekgebied van de nieuwe winning terecht komen, of zelfs al in het grondwaterbeschermingsgebied van de nieuwe winning bevinden. Net als in de vorige paragraaf beschreven voor bestaande winningen kunnen, naast preventiemaatregelen, detectie van lekkage middels grondwatermonitoring bijdragen aan het beperken van de mogelijke negatieve impact bij eventuele lekkage.

4.4 Invloed van casus-specifieke condities op de mogelijke impact

In dit onderzoek is op generieke wijze verkend hoe en in welke mate verschillende condities bij een eventueel lekkende geothermieput invloed hebben op de mogelijke impact op de kwaliteit van onttrokken grondwater bij een winning. Vanwege de generieke aanpak zijn de verkregen inzichten bruikbaar voor inhoudelijke afwegingen ter voorkoming van ongewenste impact door lekkage op grondwaterwinningen in het algemeen. Nadrukkelijk zijn de resultaten van de uitgevoerde berekeningen niet bedoeld om de mogelijke impact voor een specifieke casus bestaande uit een specifiek geothermiesysteem en een specifieke winning in voldoende detail te kunnen beschouwen. Deze impact zou namelijk sterk afhangen van de casus-specifieke condities van de lekkage (o.a. zoals verkend: debiet en brijnsamenstelling, en lekkageduur in het geval van detectie), geohydrologische condities (bodempopbouw, heterogeniteit, o.a. in relatie tot de beschouwde longitudinale dispersie) en de winning (zoals verkend: reistijd/afstand tot lekkage, grootte van de winning). Voor een casus-specifiek vraagstuk kan met een numeriek grondwatertransportmodel in meer detail de potentiële impact en de invloed van verschillende condities worden doorgerekend. Hierbij zou bijvoorbeeld ook de piekdempende (met name bij tijdelijke lekkage) en vertragende bijdrage van laterale (transversale) en dispersie aan doorbraak beschouwd kunnen worden. Daarbij kan ook de impact van niet conservatieve stoffen (zoals chloride, Paragraaf 4.1) mee worden genomen, inclusief de gevolgen retardatie door adsorptie en afbraak van verschillende stoffen in de specifieke brijn gedurende grondwatertransport richting de winning. Voor de beschrijving van de invloed van retardatie en afbraak zouden dan ook casus-specifieke bepalingen of aannames gemaakt moeten worden wat betreft adsorptie- en afbraakfactoren. Hierbij zouden dan voor de winning ook de gevolgen van niet-stationaire grondwaterstroming, zoals door putschakelingen, kunnen worden meegenomen waardoor, in tegenstelling tot in het hier beschreven generiek

georiënteerde onderzoek op basis van stroombaanberekeningen, door brijnlekkage mogelijk verdeeld kan raken over meerdere onttrekkingsputten.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

De condities die de potentiële impact beïnvloeden van een eventuele brijnlekage uit een geothermieput op onttrokken waterkwaliteit van een grondwaterwinning voor drinkwaterproductie zijn verkend aan de hand van een set analytische berekeningen voor de thermische impact (temperatuur) en een range aan realistische chlorideconcentratie in Nederlandse geothermische brijnen (formatiewater). Er is voor chloride als indicatieparameter gekozen vanwege 1) het conservatieve gedrag tijdens grondwatertransport (geen afbraak of adsorptie) waardoor het relatief snel en sterk doorbreekt 2) de concentraties in Nederlandse geothermische brijnen relatief hoog zijn (200-1000 keer hoger) ten opzichte van de drinkwaternorm (150 mg/L). Uit de berekeningen en de bijbehorende analyse zijn de volgende inzichten naar voren gekomen:

- Een relatief kleine lekkage bij de injectieput van een geothermiesysteem binnen het intrekgebied van een grondwaterwinning kan al leiden tot een negatieve impact op de onttrokken waterkwaliteit, dus ook als deze lekkage buiten een grondwaterbeschermingsgebied plaatsvindt. Dit kan leiden tot overschrijdingen van de drinkwaternorm in het ruwwater, zoals blijkt uit de beschouwing in deze studie voor chloride door de relatief hoge concentratie in Nederlandse geothermische brijnen (3-10 keer zeewater). De thermische impact bij een eventuele brijnlekage op het water in een grondwaterwinning zou zeer beperkt blijven ($<1^{\circ}\text{C}$).
- Kleinere winningen zijn gevoeliger voor de impact van een eventuele brijnlekage dan grotere winningen doordat een grondwaterwinning door het mee-onttrekken van omringend ‘schoon’ grondwater voor de belangrijkste verdunning van het met brijn verontreinigde grondwater zorgt.
- Bij een continue brijnlekage zorgt een langere reistijd tot een grondwaterwinning er vooral voor dat de impact hiervan later optreedt en daarmee meer tijd is voor maatregelen (als de lekkage snel genoeg gedetecteerd wordt). Voor stoffen die niet afbreken, zoals chloride, zou de maximale impact op de winning hetzelfde blijven ongeacht de reisafstand.
- Voor een eventuele lekkage, met een bepaald lekdebiet en brijnsamenstelling, wordt de impact op een winning met name bepaald door de lekkageduur. Ten opzichte van een continue lekkage zorgt het relatief snel (binnen enkele maanden) detecteren en stoppen van een lekkage voor sterke afname van zowel de piekconcentratie die in de winning terecht komt als de tijdsduur van de negatieve impact. Tijdige detectie kan de negatieve impact van brijnlekages uit geothermieputten op de onttrokken waterkwaliteit in grondwaterwinningen sterk beperken en mogelijk helpen voorkomen bijvoorbeeld door tijdige sanering.

5.2 Aanbevelingen

Op basis van de in dit onderzoek verkregen inzichten volgen de volgende aanbevelingen ter overweging om tot verdere inhoudelijke (beleids)afwegingen te komen ter voorkoming van ongewenste impact op grondwaterwinningen door eventuele lekkage uit geothermiesystemen:

- Omdat de negatieve impact op onttrokken grondwaterkwaliteit bij een eventuele lekkage van geothermische brijn sterk afhankelijk is van de lekkageduur, is het van belang dat in het in de praktijk duidelijk is hoe snel en vanaf welk lekdebiet een lekkage gedetecteerd kan worden. Hiertoe met voldoende zekerheid in staat zijn, kan beschouwd worden als een aanvulling op de preventieve maatregelen ter verkleining van de lekkagekans.
- Hoewel eerder onderzoek heeft aangegeven dat grondwaterimpactmonitoring nabij geothermische putten potentie heeft voor tijdige lekdetectie naar grondwater (Paragraaf 4.2) is verdere toetsing en technische ontwikkeling nodig om toepassing in de praktijk mogelijk te maken.

- Voor de impactberekeningen voor brijnlekkage is in dit onderzoek uitgegaan van grondwatertransport langs stroombanen waarbij alleen longitudinale dispersie tot verdunning leidt. Hoewel de uiteindelijke impact bij continue lekkage naar verwachting niet anders zal zijn (paragraaf 3.2), zal in realiteit het ook plaatsvinden van dispersie loodrecht (transversaal en verticaal) op de stromingsrichting vertragend werken op de aankomst en doorbraak van de impact. De mate waarin het optreden van transversale en verticale dispersie bijdraagt aan het vertragen en dempen van behulp kan verkend worden middels numerieke transportsimulaties, waarbij ook de doorwerking van tijdelijke lekkageduur (paragraaf 3.3) kan worden meegenomen voor inzicht in hoeverre de bijbehorende tijdschalen voor verwachte impact op een winning verschuiven.
- Voor deze generieke verkenning van de impact op een grondwaterwinning lag voor het bepalen van snelheid doorbraak en mate van impact gebruik gemaakt van voor geothermische brijn representatieve chlorideconcentraties, als indicatorparameter voor hoe ook andere conservatieve componenten zich zouden gedragen. Door het optreden van adsorptie tijdens grondwatertransport zou het moment van eerste doorbraak van andere parameters (zoals zware metalen of organische verbindingen) nog veel langer op zich laten wachten. Hierdoor zou, bij doorgaande onttrekking, ook de totale duur van negatieve impact verlengd worden, door de opeenvolgende doorbraak van verschillende parameters. Om inzicht te krijgen hoe en in welke mate de totale duur van negatieve impact bij doorgaande onttrekking zou optreden, zou verkend kunnen worden op basis van een analyse van de beschikbare samenstellingen van geothermische brijnen in Nederland. Hiermee zou een overzicht gemaakt kunnen worden welke combinatie van parameters de negatieve impact en de duur daarvan bepalen en de mate waarin dat verschilt voor een range aan geothermische brijnsamenstellingen in Nederland.
- Met behulp van een numeriek model zou de invloed van casus-specifieke condities op de te verwachten impact op een winning door onder andere niet-stationaire stroming door putschakelingen en volledige brijnsamenstelling beschouwd kunnen worden.
- Naar mate een eventuele brijnlekkage sneller gedetecteerd en gestopt wordt, wat sterk bijdraagt om de negatieve impact op de winning te beperken, zal het volume en de verspreiding van het naar grondwater gelekte geothermische brijn beperkter zijn. Hierdoor zal ook een eventuele saneringsinspanning om de impact op de winning in zijn geheel te voorkomen beperkter zijn. Ten behoeve van het handelingsperspectief bij constatering van een brijnlekkage is het nuttig om inzicht te krijgen hoe verschillende condities (o.a. gelekt brijnvolume en brijnsamenstelling) de mate van benodigde saneringsinspanning en -aanpak beïnvloeden.
- Dit onderzoek heeft relatief lange reistijden (>25 jaar) beschouwd vanwege de uitsluiting van geothermie binnen grondwaterbeschermingsgebieden. De resultaten geven echter aan dat reistijd bij continue brijnlekkage geen verschil maakt op de uiteindelijke impact op de winning en dat langere reistijden alleen beperkend werken op de mate van uiteindelijke impact als een eventuele brijnlekkage relatief snel (~<1 jaar) gedetecteerd wordt. Het kunnen beperken van lekkageduur vanuit geothermiesystemen die zich buiten grondwaterbeschermingsgebieden, maar nog wel binnen de intrekgebieden van grondwaterwinningen bevinden, is daarom van belang om te beschouwen voor een volledig perspectief op de potentiële impact van een eventuele brijnlekkage op grondwaterwinningen.
- Naast dat de realisatie van geothermiesystemen in NGRs een ruimtebeslag legt voor de realisatie van grondwaterbeschermingsgebieden voor nieuw te realiseren winningen, geldt hier ook dat eventuele brijnlekkage (voor of na realisatie van een nieuwe winning) van buiten die grondwaterbeschermingsgebieden tot negatieve impact op de nieuwe winning zouden kunnen leiden. Om inzicht te verkrijgen in welke mate het ruimtebeslag van (toekomstige) geothermiesystemen zich verhoudt tot de mogelijkheid voor de realisatie van nieuwe grondwaterwinningen in relatie tot resulterende grondwaterbeschermings- en intrekgebieden zou in een verkenning voor een of meerdere NGRs beschouwd kunnen worden. Hierbij zou rekening gehouden kunnen worden met zowel voorkeuren en randvoorwaarden voor de realisatie van nieuwe grondwaterwinningen als met een toenemend aantal geothermiesystemen op locaties met een hogere waarschijnlijkheid op basis van warmtevraag.

6 Referentielijst

- Cirkel, D. G., & Hartog, N. (2017). *Grondwatermonitoring bij Geothermieputten*. KWR. BTO 2017.075.
<https://library.kwrwater.nl/publication/55459247/grondwatermonitoring-bij-geothermieputten/>
- Gelhar, L. W., & Collins, M. A. (1971). General Analysis of Longitudinal Dispersion in Nonuniform Flow. *Water Resources Research*, 7(6), 1511–1521. <https://doi.org/10.36074/2617-7064.09.006>
- Geothermie Nederland. (2021). *Industriestandaard Duurzaam Putontwerp voor aardwarmteputten*.
<https://geothermie.nl/actueel/nieuws/geothermie-nederland-bundelt-ruim-10-jaar-ervaring-in-eigen-industriestandaard-duurzaam-putontwerp/>
- Hartog, N. (2015) *Geochemical Assessment of Injectivity Problems in Geothermal Wells* KWR 2015.012
- Hartog, N. (2016). *Risico's van Geothermie voor Grondwater*.
<https://library.kwrwater.nl/publication/54566443/risicos-van-geothermie-voor-grondwater/>
- Hartog, N., Cirkel, G., Slangen, G. J., Vis, R., & Watering, F. van de. (2020). *Grondwatermonitoring bij geothermiesystemen: een praktijkverkenning*.
https://www.kasalsenergiebron.nl/content/user_upload/109557-20-009.001-rapd-Grondwatermonitoring_bij_geothermiesystemen-signed.pdf
- Maas, K. (2010). Hatsi-kD: Vuistregels in de hydrologie. *Stromingen*, 16, 79–83. <https://edepot.wur.nl/378845>
- Toride, N., Leij, F. J., & van Genuchten, M. T. (1999). *The CXTFIT code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiments. Version 2.1*.
https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/20360500/pdf_pubs/P1444.pdf
- van der Molen, J., & Tolsma, S. (2024). *Aardwarmte in Nederland*. <https://repository.tno.nl/SingleDoc?find=UID39b482cf-604f-4715-89c1-37a377c70d7e>
- van Genuchten, M. T., & Alves, W. J. (1982). Analytical Solutions of the One-Dimensional Convective-Dispersive Solute Transport Equation. In *Technical Bulletin - United States Department of Agriculture*.
[https://doi.org/10.1016/0378-3774\(84\)90020-9](https://doi.org/10.1016/0378-3774(84)90020-9)
- van Lopik, J., & Hartog, N. (2023). *De verspreiding van geothermische brijn door putlekage in grondwater: Evaluatie van signalering bij grondwatermonitoring*. KWR. WarmingUP.
<https://www.warmingup.info/documenten/verspreiding-geothermische-brijn.pdf>
- IPO, Vewin, Ministerie Infrastructuur en Waterstaat (2025) Actieprogramma beschikbaarheid drinkwaterbronnen 2023-2030

I Analytische methoden

I.I Continue lekkage: mengverhouding

De berekening van de chlorideconcentratie en temperatuur in evenwichtssituatie voor een continue lekkage is een massabalans. Op dat punt is de massa chloride en de hoeveelheid warmte die lekt namelijk gelijk aan de hoeveelheid die door de winning wordt onttrokken. Hieronder is deze massabalans opgesteld aan de chlorideconcentratie en -massa. Deze zelfde balans geldt ook voor warmte, waarbij de temperatuur (°C) als equivalent van de concentratie (g/l = kg/m³) wordt beschouwd.

Als eerste is de lekmasa per tijdseenheid m_{lek} [kg/dag] bepaald aan de hand van de lekconcentratie C_{lek} [kg/m³] en het lekkagedebiet Q_{lek} [m³/dag]:

$$m_{lek} = C_{lek} Q_{lek} \quad (1)$$

De massa die in de getroffen grondwaterput terecht komt (m_{put} [kg/dag]) was gelijk aan de som van de lekmasa en de massa in het niet getroffen grondwater dat onttrokken werd:

$$m_{put} = m_{lek} + C_{wvp} (Q_{put} - Q_{lek}) \quad (2)$$

Hier is C_{wvp} [kg/m³] de achtergrondconcentratie in het watervoerende pakket en Q_{put} [m³/dag] het onttrekkingsdebiet van de put, berekend aan de hand van het debiet van de gehele winning Q_{win} [m³/dag] en het aantal putten n_{put} [-]:

$$Q_{put} = \frac{Q_{win}}{n_{put}} \quad (3)$$

De concentratie in de getroffen grondwaterput C_{put} [kg/m³ = g/l] is daarna berekend volgens:

$$C_{put} = \frac{m_{put}}{Q_{put}} \quad (4)$$

Tot slot is de concentratie in het ruwwater C_{ruw} [kg/m³] voor de gehele winning bepaald volgens:

$$C_{ruw} = \frac{C_{put} + C_{wvp} (n_{win} - 1)}{n_{win}} \quad (5)$$

I.II Continue lekkage: doorbraak

De doorbraak bij een continue lekkage is berekend aan de hand van een variant van de vergelijking opgesteld door Gelhar & Collins (1971). Hierbij is door doorbraak in de put van de chlorideconcentratie uit het brijn $C_{lek,put}$ [kg/m³] gegeven door:

$$C_{lek,put} = C_{wvp} + (C_{lek} - C_{wvp}) \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_{put}^2 - x_t^2}{\sqrt{\frac{(16\alpha)}{3} x_t^3}} \right) \quad (6)$$

Hier is $erfc$ de complementaire errorfunctie, X_{put} [m] de afstand van de geothermieput tot de onttrekkingsput en x_t [m] de gemiddeld afgelegde afstand van het front van de lekkage op tijdstip t [dagen]. Deze afstand is gegeven door:

$$x_t = \frac{\sqrt{Q_{win} t}}{\pi \theta L_{wvp}} \quad (7)$$

Hier is θ [-] de porositeit en L_{wvp} [m] de dikte van het watervoerend pakket. X_{put} is gegeven door het invullen van de gemiddelde reistijd van geothermieput tot onttrekkingsput (in dagen) in (7). Uit gemiddelde berekeningen bleek diffusie verwaarloosbaar ten opzichte van dispersie. Diffusie is daarom niet meegenomen in (6). De onttrokken chloridemassa uit het brijn is vervolgens bepaald volgens (1), met $C_{lek,put}$ i.p.v. C_{lek} . De concentraties in de getroffen put en het ruwwater zijn berekend volgens (2) t/m (5).

I.III Tijdelijke lekkage: doorbraak

Bij een tijdelijke lekkage is er sprake van een ‘puls’ van brijn dat gedurende een bepaalde periode met een bepaalde concentratie en debiet lekt uit de injectieput van het geothermiesysteem. Een analytische oplossing van een dergelijke puls is gegeven in de CXTFIT-handleiding (Toride et al., 1999, vergelijking (2.20)), op basis van eerder werk (van Genuchten & Alves, 1982). Voor het berekenen van de doorbraak van het brijn in de onttrekkingsput bij een tijdelijke lekkage, waarbij de lekkage start $t = 0$ en stopt op $t = t_s$, is berekend aan de hand van de eerste-orde benadering van deze vergelijking:

$$C_{lek,put} = C_{aq} + (C_{lek} - C_{aq}) \left(\frac{1}{2} erfc \left(\frac{X_{put} - v_{av} t}{\sqrt{4 \alpha v_{av} t}} \right) + \frac{1}{2} \frac{X_{put}}{\alpha} \frac{1}{2} erfc \left(\frac{X_{put} - v_{av} t}{\sqrt{4 \alpha v_{av} t}} \right) \right) \quad \text{voor } t \leq t_s \quad (8)$$

En:

$$C_{lek,put} = C_{aq} + (C_{lek} - C_{aq}) \left(\frac{1}{2} erfc \left(\frac{X_{put} - v_{av} (t - t_s)}{\sqrt{4 \alpha v_{av} (t - t_s)}} \right) + \frac{1}{2} \frac{X_{put}}{\alpha} \frac{1}{2} erfc \left(\frac{X_{put} - v_{av} (t - t_s)}{\sqrt{4 \alpha v_{av} (t - t_s)}} \right) - \frac{1}{2} erfc \left(\frac{X_{put} - v_{av} t}{\sqrt{4 \alpha v_{av} t}} \right) - \frac{1}{2} \frac{X_{put}}{\alpha} \frac{1}{2} erfc \left(\frac{X_{put} - v_{av} t}{\sqrt{4 \alpha v_{av} t}} \right) \right) \quad \text{voor } t > t_s \quad (9)$$

Hier is v_{av} [m/dag] de gemiddelde stroomsnelheid tussen de geothermieput en de onttrekkingsput, gegeven door:

$$v_{av} = X_{put} / t_{RT} \quad (10)$$

Waar t_{RT} [dagen] de gemiddelde reistijd tussen geothermieput en onttrekkingsput is. De concentraties in de getroffen put en het ruwwater zijn vervolgens berekend volgens (1) t/m (5).