



Openbaar rapport DIMOPREC

Development of a well **i**mpairment **m**odel for **p**redicting geothermal **c**logging

Methode en apparatuur ontwikkeling m.b.t het herkennen en opsporen van verstopping als gevolg van mineralisatie tijdens het mijnen van warmte in een geothermisch systeem.

September 2022

Karl-Heinz Wolf
Ahmed Hussain
Bernhard Meulenbroek
Wouter van der Star
Han Claringbould



Openbaar eindrapport

Verzonden naar e-innovatie@rvo.nl

Dit openbare eindrapport is bedoeld voor een breder publiek dan specialisten. Het is gepubliceerd nadat rechten op de kennis zijn vastgelegd. Het gaat hierbij uitdrukkelijk niet om de commerciële promotie van de producten of projectresultaten. Dit eindrapport is beschikbaar en kan worden verkregen als PDF van de DIMOPREC website.

	Pagina
Project informatie en partners	3
1. Gegevens project	
□ Samenvatting van de uitgangspunten en de doelstelling van het project en de (eventueel) samenwerkende partijen	4
2. Inhoudelijk eindrapport	6
□ Wijze van aanpak en samenvatting	6
□ Beschrijving van de behaalde resultaten, de knelpunten en het perspectief voor toepassing;	14
□ Beschrijving van de bijdrage van het project aan de doelstellingen van de regeling (duurzame energiehuishouding, versterking van de kennispositie)	14
□ Spin off binnen en buiten de sector	15
□ Overzicht van openbare publicaties over het project en waar deze te vinden of te verkrijgen zijn;	16
□ Vermelding waar en tegen welke prijs meer exemplaren van dit rapport te bestellen zijn;	16
□ Vermelding van contactpersoon (personen) voor meer informatie	16
□ Vermelding van de verkregen subsidie	16

ERKENNING

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie en uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

1. Project informatie

- Projectnummer : T GEO119001
- Project titel : DIMOPREC
Development of a well impairment model for predicting geothermal clogging
- Project administrator and Partners : - Delft University of Technology – Administrator
- Veegeo BV – Rotterdam: Partner
- Deltares – Delft: Partner
- Project period : 01/01/2020 – 01/01/2022 and extended to 01/07/2022
- Publicatie datum indiening bij RVO : 30 September 2022

Tabel 1: Partner organisaties, hun bijdragen en expertise.

Participating Project Members.	Role
Dr. K-H.A.A. Wolf TU-Delft, CEG	Project Coördinator. <ul style="list-style-type: none">• Petrofysika, petrografie, geologie.• Communicatie met Deltares and Veegeo m.b.t. geotechnische onderwerpen en and data interpretatie.
Dr.A.A.A. Hussain TU-Delft, CEG	Hoofdonderzoeker voor dit programma. <ul style="list-style-type: none">• Ontwikkeling en programmering van het model .• Wiskunde en modellering van mineralisatie en code voor materiaal disseminatie.• Reservoir Engineering.• Technische communicatie en interactie met Veegeo and Deltares voor de bouw van de SKID, put interpretatie en gesteente/vloeistof-interactie.
Dr.B.J. Meulenbroek TU-Delft, EEMCS/ Mathematics	<ul style="list-style-type: none">• Mathematische aspecten als bijdragen voor de ontwikkeling van het model, de mineralisatie en verspreidingscode.
Dr. W.van der Star Deltares	<ul style="list-style-type: none">• Water karakterisatie: chemie, natuurkunde en vloeistof-bodem interactie.• Contributie in de technische-wetenschappelijke communicatie voor de ontwikkeling van de SKID. Bijdragen aan het model m.b.t. mineralisatie en verspreiding.
Dr.N. Khoshnevis Gargar Deltares & TU-Delft	<ul style="list-style-type: none">• Reservoir Engineer.• Ontwikkelaar van het concept en medeschrijver van het Dimoprec project.• Input ondersteuning voor het computer model.
Prof.Dr. J. Bruining TU-Delft, CEG	<ul style="list-style-type: none">• Professor Emeritus in Petroleum Engineering.• Ontwikkelaar van het concept en medeschrijver van het Dimoprec project.• Input ondersteuning voor het computer model.
Ir. A. Reerink (former) Veegeo BV	<ul style="list-style-type: none">• Reservoir Engineer• Ontwerper van de SKID en and liaison voor Deltares and TU-Delft m.b.t. data-acquisitie, keuze van apparatuur en bouw.• Verantwoordelijke voor de implementatie en gebruik in het veld.
Dr. H. Claringbould Veegeo BV	<ul style="list-style-type: none">• Geoloog.• Data aanlevering m.b.t. geothermische installaties, pijplijnsystemen voor de code ontwikkeling.• Aanleveren van relevante put data.• Verantwoordelijke voor de implementatie en gebruik in het veld.

Samenvatting van de uitgangspunten en de doelstelling van het project en de (eventueel) samenwerkende partijen

Introductie

Door de grote mate van beschikbaarheid van overtollige warmte is geothermie een enorm grote bron voor milieuvriendelijke energieopwekking. Het Nederlandse Masterplan Geothermie streeft naar een groei van aardwarmte tot circa 50 PJ (175 doubletten) in 2030 en 200+ PJ (700+ doubletten) in 2050. Ofwel een CO₂-reductie van 5% van de 930 PJ warmteproductie in 2030 en 23% van de 870 PJ in 2050.

Systeemvoorspelbaarheid en energie-efficiëntie zijn dus essentieel en daaraan gerelateerde zijn:

- 1) Een verbeterde kosteneffectiviteit;
- 2) Veilige en effectieve operaties, en;
- 3) Een sterk maatschappelijk draagvlak.

In het kader van dit project betekent dit dat reguliere technische problemen van de gesloten productie, warmtewinning en terug- injectie zijn gekoppeld aan systeem-vloeistof interacties onder veranderende temperaturen en vloeistofdruk. Bij veranderende vloeistofdruk, ontgassing en temperatuurveranderingen kunnen verschillende soorten mineralen en gassen kalkaanslag en verstopping veroorzaken binnen het geothermische systeem, zowel aan het oppervlak als in-situ. Bijvoorbeeld; met de nieuwe milieuwetten in het achterhoofd, leiden lagere injectie- en productiesnelheden tot hogere pompkosten en daarmee hogere energiebehoefte, oftewel extra CO₂-uitstoot; dit kan een showstopper zijn. Daarom hebben de partners in dit programma de theorie en praktijk gecombineerd om tegelijkertijd een voorspellingmodel en veldapparatuur te ontwikkelen om mineralisatie te detecteren en te beheren.

Uitgangspunten:

Het algemene uitgangspunt van Dimoprec is het versnellen van energie-efficiënte geothermische ontwikkeling. Door kennisontwikkeling minimaliseren we operationele risico's en verlengen we de levensduur van geothermische systemen, zowel aan het oppervlak als ondergronds. Daardoor worden de circulerende watersystemen effectiever, de operationele kosten minder en daarnaast reduceren we milieu-maatschappelijke risico's. Uiteindelijk bewaren en bewaken we de in-situ integriteit van de ondergrond rond het reservoir.

Onze directe doelstellingen zijn:

- Ontwikkeling van een voorspellingsmodel om verstopping en mineralisatie te voorspellen en in het veld te ontdekken. Dit op basis van veld- en productie-data.
- Op basis van de veldgegevens een waterscanner te ontwerpen en te bouwen, die parallel aan de geothermische productie lijn, op diverse plaatsen kan worden aangekoppeld om divers fysio-chemische metingen te verrichten.
- Met behulp van de resultaten van de eerdergenoemde doelstellingen is een generiek besluitvormings-instrument ontworpen om preventief water te behandelen en/of vorming van bezinksel en verstoppingen te voorkomen.

Hierdoor worden de verbetering van productiviteit en injectiviteit bevordert.

Hoe hebben we ons doel bereikt:

1. Er is een modelstudie gedaan naar een selectie van geothermische doubletten in Nederland, waarbij gezocht is naar installaties die goed kunnen worden geïnterpreteerd. Deze putten met warmtewisselaars zijn min of meer gesloten systemen waarin weinig of geen additieven zijn gebruikt in het oppervlakte deel

en in de injectieput, ofwel:

- We kunnen voorspellende data vinden om geochemische modellen van het neerslagproces, inclusief de impact op aangepaste operationele omstandigheden, te ontwikkelen en/of te reconstrueren.
- We kunnen gaan voorspellen wat het effect wordt van het neerslaan en oplossen van mineralen op stroming, energie-efficiëntie en allerlei milieuaspecten.

2. Met behulp van informatie uit 1), is een apparaat (Skid) ontwikkeld en gebouwd om veldmetingen te doen. Door deze metingen te analyseren kan op verschillende plaatsen aan het oppervlak en diep in het reservoir worden gekarakteriseerd “ wat, waar en hoe” de vloeistof met de transportleidingen en gesteenten mineraliseert. Daarnaast is een test voor mineralisatie-mechanismen - aan de het oppervlak en aan de injectiezijde (put) - ontwikkeld waarvoor deze sensoren data kunnen leveren.

Wie zijn de samenwerkend partijen?

Deze samenwerking is eigenlijk een uitwisseling van expertises, waarin de ervaring van industriële technische en organisatorische kennis wordt gekoppeld aan technisch wetenschappelijke kennis om een algemeen geothermische hulpmiddel te ontwikkelen, uit te rollen en uiteindelijk toe te passen.

De samenwerkend partijen zijn:

- Veegeo B.V. een bedrijf gespecialiseerd in de ontwikkeling en monitoring van Geothermische Installaties. Zij hebben een jarenlange ervaring in het veld. Ze weten inhoudelijk de technische staat van vele doubletten in Nederland en kunnen deze koppelen aan gangbare technische problemen en daaraan gerelateerde oplossingen.
- Technische Universiteit Delft, de afdelingen “Geoscience & Engineering” en “Toegepaste Wiskunde”. Twee afdelingen die onderwijs geven in geothermie en onderzoek doen naar allerlei geologische, geofysische, geochemische, gesteente-mechanische en reservoir technische processen en alle de verkregen informatie via experimentele activiteiten, veldwerk en middels modelleren met elkaar in verband probeert te brengen. Met name bij het samenstellen van de modellen is de inbreng van de Toegepaste Wiskunde essentieel.
- Onderzoeksinstituut Deltares is een onafhankelijk instituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Zij zijn zeer vakkundig in het karakteriseren van de velen soorten water in onze ondergrond, de interactie met bodems en werken aan praktische antwoorden, vernieuwing en toepassingen ten behoeve van ons land en onze samenleving.

De deelnemende medewerkers, hun betrokkenheid en expertise zijn samengevoegd in tabel 1. De partijen gebruiken hun gedeelde kennis om een meetapparaat te ontwikkelen en te bouwen en om deze te gebruiken in de ondergrond. Met de metingen bekijken we wat er met het water en het gesteente gebeurt. Daarna gebruiken we al onze observatie om, met behulp van ons nieuwe concept, voorspellingen te doen met betrekking tot verstopping (mineralisatie) van het kringloopsysteem. De relatie wordt weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2: Samenwerking tussen de partners en de uitwisseling van expertise Interaction om het mineralisatie-voorspellingsmodel te ontwikkelen en de SKID te bouwen.

	Evaluation and screening	Statistical relevance	Field data	Basic modelling	Field modelling	Field data testing	Mineralization prediction	Basic SKID development	SKID measurement tools	
Delft University	X	X	X	X	X	X	X		X	
Veegeo	X		X			X		X	X	
Deltares	X	X		X		X	X		X	

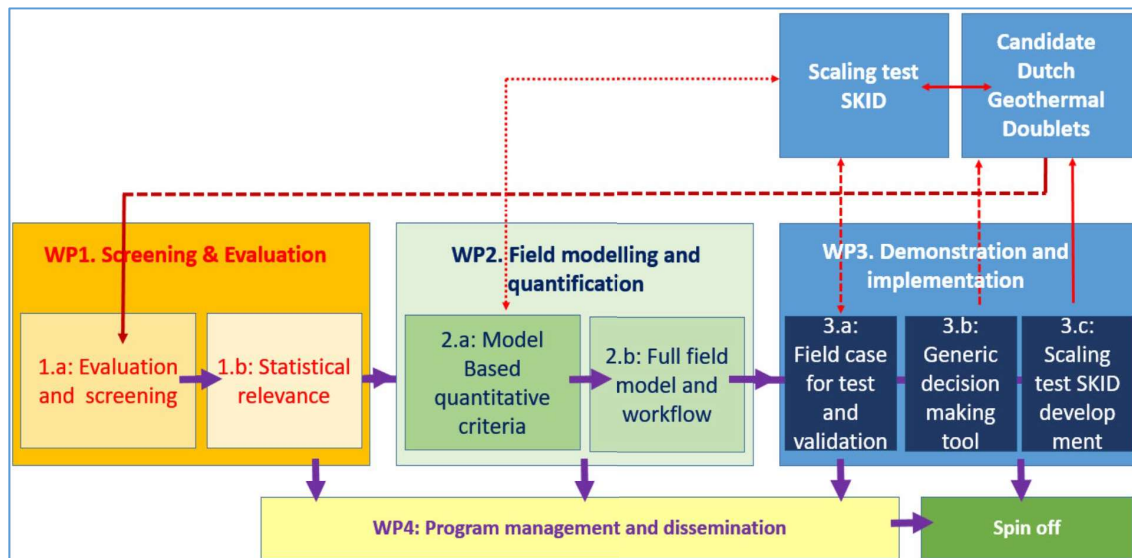
2. Inhoudelijk eindrapport

□ Wijze van aanpak en samenvatting

Wijze van aanpak

Het project is ingedeeld in drie werkpakketten (WP's) voor het onderzoek, ontwikkeling en implementatie van het model en de Skid. WP4 is bedoeld voor administratie en communicatie en komt hier niet ter sprake. Figuur 1 toont schematisch hoe alle onderdelen met elkaar zijn verbonden en de uiteindelijke doelstellingen kunnen worden behaald.

In WP1 en WP2 richtten de Universiteit Delft en Deltares zich op het oorspronkelijke concept van prof. Bruining, dr. Khoshnevis Gargar en dr. Meulenbroek om productiewater te gebruiken om mogelijke gevaren van oplossing (ook corrosie) en mineralisatie (verstopping) van het leidingsysteem onder bepaalde druk- en temperatuurveranderingen te voorspellen. Deltares heeft gebaseerd op dit basisconcept haar uitgebreide expertise in grondwaterkarakterisering/mineralisatie en chemische analyse toegepast.



Figuur 1: Plan van aanpak in een flowchart, waarbij de relatie tussen de verschillende werkpakketten wordt weergegeven. Het eindresultaat is een mineralisatiemodel en meetapparaat voor Nederlandse geothermische systemen.

De traditionele aanpak met PREEQC bleek relatief traag en omslachtig. Vandaar dat een dubbele aanpak met een nieuw ontwikkeld programma met COMSOL is gecombineerd met PREEQC. Nu is het mogelijk om de snelle en langzame geochemische processen die optreden tijdens productie, warmte-uitwisseling en injectie samen te brengen. Het wiskundige deel, ontwikkeld door dr. Meulenbroek en softwarekoppeling door dr. Hussain, gecombineerd met de water-expertise van dr. van der Star, zijn samengevoegd in een geochemisch model van oplossing en het neerslagprocessen waarin de impact van aangepaste operationele omstandigheden (temperatuur, vloeistofdruk en materialen) zijn meegenomen.

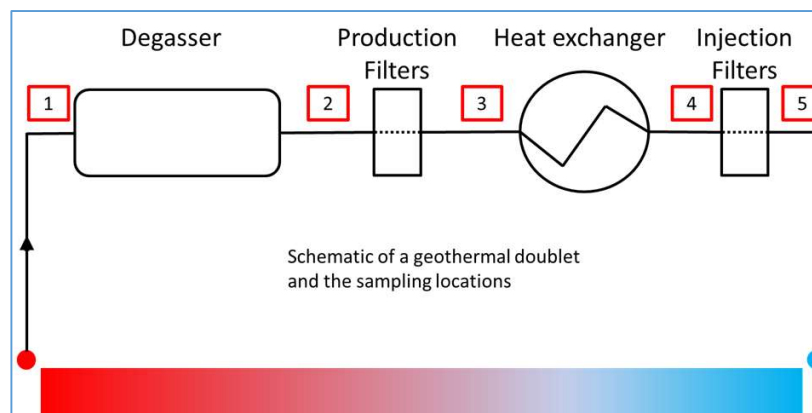
In WP3 komt al het theoretische en praktische werk samen. De ontwikkeling van de SKID loopt parallel met WP2. De verkregen data leveren de details voor specificaties en posities van de analyse-apparaten die in een speciale buis worden geplaatst. Hierbij is rekening gehouden met debieten, vloeistofdrukken en temperaturen om het systeem zo voor te bereiden dat het in een geothermisch doublet kan worden geïmplementeerd. Deze

samenmelting van laboratoriumexpertise, praktijkervaring en commerciële toepassingen was en is een samenwerking die ervoor heeft gezorgd dat de apparatuur op een locatie in het veld staat opgesteld.

Samenvatting van alle resultaten

Alle projectonderdelen zijn afgerond.

- Het modelleringsprogramma voor mineralisatie en mineralenverspreiding in de oppervlakesystemen en in de ondergrond is ontwikkeld en getest. Het is beschikbaar, met handleiding, op de projectwebsite en via de TU-Delft repository, i.e.: “Modelling mineralization in geothermal reservoirs: combining a local equilibrium and a kinetics approach”. Voor details kunt u dit rapport bestuderen.
- De SKID is ontwikkeld en samengesteld op basis van capaciteit, i.e.; met betrekking tot stroomsnelheid, pekelgeleiding, druk en temperatuur. Het apparaat kan worden gekoppeld aan een gangbaar data-acquisitie systeem en worden gekoppeld aan een geothermische oppervlakte-installatie, langs de stroomrichting, zoals gedefinieerd in figuur 2. Het concept zal mogelijk worden gebruikt voor continue monitoring in het Delft Aardwarmte Project (DAP).

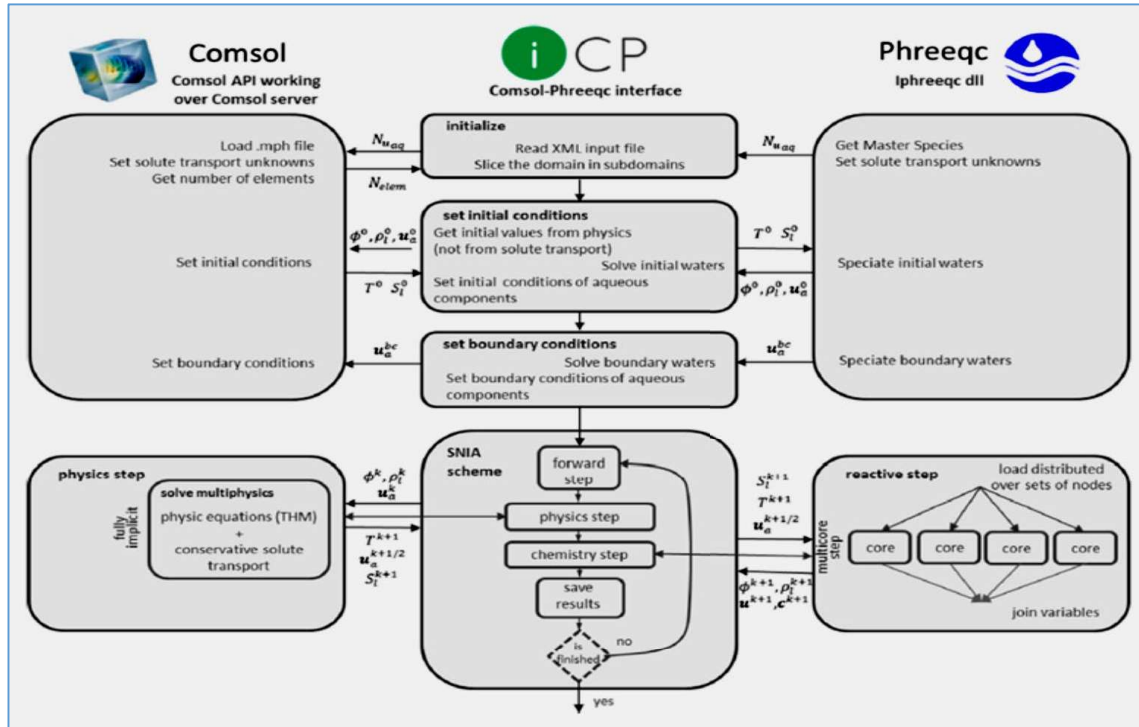


Figuur 2: Schematisch overzicht van het grotendeels gesloten system. Deze doublet is gebruikt voor de water bemonstering t.b.v. mineralisatiemodel (Fieldcase A). De geothermische vloeistof is nauwelijks beïnvloed door redox reacties a.g.v. materiaalsamenstelling en inhibitors .

- Naar aanleiding van de water analyses, zijn spin-offs voor (radioactieve) mineralisatie, “zeldzame aarden” daardoor strategisch-economische delfstoffenwinning (speciaal voor Nederland) zijn meegenomen in deze studie. De resultaten zijn in additionele rapportages verwerkt, beschikbaar via de TU-Delft repository.

De werking van het model

Het model is een samenstelling van drie softwarepakketten; PHREEQC, COMSOL en iCP, zie figuur 3. PHREEQC evalueert de chemische reacties die in het geothermische water onder P,T-condities optreden en bepaalt de fasen aanwezig in de vloeistof. COMSOL modelleert met spatiële en fysisch chemische randvoorwaarden vloeistofstromingen in een “poreus” systeem. De interface cor COMSOL and FREEQC (iCP) genereert een database die beide programma’s interactief zal verbinden. In de eerste fase is het relevant om alle vloeistof en mineraal- samenstellingen, fysisch-chemische parameters en spatiele eigenschappen in beide programma’s te construeren. Als dit per stap in verandering van druk, temperatuur en volumes is gedefinieerd, dan komt in het tweede deel een serie van iteraties via de iCP, waarin per tijdseenheid over een bepaald verspreidingsgebied voor de eerder gedefinieerde mineralen en oplossingen de veranderingen worden berekend. De verspreiding en concentratieverandering van de vloeistof en mineraalfasen kan door de tijd worden vastgesteld.



Figuur 3: Schema voor communicatie tussen en activiteiten binnen COMSOL, iCP and PHREEQC.

Samenvatting resultaten per werkpakket

Voor een uitgebreide beschrijving van werkpakket 1 en 2, wordt gerefereerd naar de rapportage m.b.t. het model: "Modellering van mineralisatie in geothermische reservoirs: een combinatie van een lokaal evenwicht en een kinetische benadering". Het rapport is in het engels.

Werkpakket 1: Screening & identificatie van geothermische doubletten en inventarisatie van fysio- en geochemische processen:

Allereerst is er een gedetailleerde studie gemaakt van de kinetiek van de ondergrondse reacties in diepe geothermische reservoirs voor screening en evaluatie van representatieve Nederlandse geothermische velden. Vervolgens zijn statistische procedures toegepast om de gevolgen van de specifieke kennisleemten van geochemische gegevens te kwantificeren.

De activiteiten zijn gebaseerd op resultaten van de veldactiviteiten en input van waterchemie uit de putten - (water- en schaalsamenstelling). De put- en chemiegegevens zijn aangeleverd door Veegeo en Deltares. Databases voor mineralisatie, kinetische benaderingsparameters en evenwichtsconstanten zijn samengesteld. Een deel van de data is afkomstig van laag-enthalpie geothermieprojecten in Nederland met waarden voor de pH van 4-7 en temperatuur van 35 - 90°C, zoals aanwezig tot circa 2500 m diepte. Kinetische benaderingsparameters waren niet altijd beschikbaar voor relevante mineralen, zoals lepidocrociet en magnesioferriet. De iCP databank wordt gebruikt voor:

- Een compilatie van snelheidsparameters van water-mineraal interactiekinetiek voor geochemische modellering
- Een bibliotheek met BASIC-scripts van reactiesnelheden voor geochemische modellering met behulp van PHREEQC.
- De LLNL thermochemische databank.

- Oploskinetiek van; sfaleriet in een zure omgeving; van calciëet, dolomiet en magnesiet bij 25 °C en 0 tot 50 bar $p\text{CO}_2$; van veldspaat en Gibbs-afhankelijkheid van vrije energie in een met CO_2 verrijkt grondwatersysteem, Green River, Utah.
- Oplossnelheden van mineralen onder CO_2 -opslagcondities.
- De kinetiek van het oplossen en neerslaan van bariet in water en natriumchloride-pekkel bij 44–85°C.
- Kinetische oplossing van carbonaten en Mn-oxiden in zuur water: meting van in situ veldsnelheden en reactieve transportmodellering.

De veldcasus die we gebruiken voor onze modellering is een laag-enthalpie geothermie-project in het West-Nederland Bekken.

De statistische procedures waarmee geochemische model resultaten kunnen worden gekwantificeerd is allereerst door vergelijking van een standaard numerieke berekening met die van het analytisch model. Verder worden onzekerheden m.b.t. de kinetische parameters en het onzekerheidsbereik (beperkte p, T ranges) van de numerieke resultaten meestal opgelost met behulp van bekende voorspellingen over mineraalneerslag in het boorgat nabij het injectiepunt en de graad van onbetrouwbaarheid van de observaties. Verder maken we gebruik van het analytische model beschreven in WP2 om een steady-state-oplossingen te geven en om het onzekerheidsbereik in mineralisatiemodellering te bepalen. Relevante parameters en/of vrijheidsgraden zijn; de activeringsenergie; reactieve oppervlakten; pre-exponentiële constanten, en methodologieën om het reactieve oppervlak van een mineraal te bepalen en welke methodologie relevanter is voor veldmodelmodellering. De ontwikkeling van het analytische en numeriek model worden beschreven in WP2.

Referentie rapportage: “Modelling mineralization in geothermal reservoirs: combining a local equilibrium and a kinetics approach”. Voor details kunt u dit rapport bestuderen.

Werkpakket 2: Een veldmodel voor het herkennen en vermijden van neerslag, om neerslageffecten op stroming, energie-efficiëntie en geo-milieuaspecten te bestuderen.

Met andere woorden: De geochemische modellen en workflows voor chemische en thermische evenwichtsveranderingen zijn zodanig ontwikkeld dat als gevolg van variaties in geothermische reservoirs en operationele omstandigheden wijzigingen in reactiegedrag (neerslag of oplossing van mineralen) kunnen worden bepaald

De model benadering

Voor de productieput tot de injectie put en downhole is er een 1D-aanpak. Aan het oppervlak is het een buis met vloeistof onderhevig aan verlaging van druk en temperatuur richting het injectiepunt. Op diepte zijn we geïnteresseerd in het in een geothermisch reservoir met hoogte H rond de injectieput met een straal r die ons werkgebied beschrijven en wordt gedefinieerd m.b.v. cilindrische coördinaten.

- In het analytisch model nemen we aan dat het reservoir lateraal homogeen is dat alle lagen continu zijn in een horizontaal vlak en een effectief radiaal werkdomein hebben voor de gesteente-vloeistof interactieprocessen.
- In de numerieke model gebruiken we twee opties. 1) een segment van het vlak (taartpunt) met een minimale en maximale radiale begrenzing, en 2) een (numerieke) maximum straal die groot genoeg is om onafhankelijke resultaten te verkrijgen, onafhankelijk van afstand.

Zoal eerder aangegeven, gebruiken we ook een effectief eendimensionaal numeriek domein, waarin we onze numerieke en analytische resultaten kunnen vergelijken.

In het snelheidsveld (verspreiding), nemen we aan dat de vloeistof stroming niet samendrukbaar is. Daarnaast gebruiken we een continuïteitsvergelijking voor de Darcy-snelheid. Verder is de wet van Darcy toegepast, wat

betekent dat we een ruimtelijk afhankelijke permeabiliteit, de vloeistofviscositeit en vloeistofdruk nodig hebben. Bij de injectieput wordt het retourwater met een constante snelheid geïnjecteerd, dus we hebben een constante radiale snelheid. Nu de snelheid binnen het systeem bekend is, kunnen voor de diverse mineraal- en vloeistoffasen een transportvergelijking worden samengesteld. Voor elke mineraalsoort hebben we een reactie-diffusie-convectievergelijking waarin mineralisatie wordt gedefinieerd als een netto "neerslagsnelheid". Deze snelheid is gerelateerd aan de beschikbare parameters voor temperatuur en de soortconcentraties en door gebruik te maken van de ionische activiteit producten (afhankelijk van de concentraties).

De numerieke benadering mee gedetailleerd

In deze sectie wordt in het kort de interactie tussen de drie programma's beschreven en geven we aan hoe het model tot stand is gekomen. Figuur 3 toont een overzicht van de communicatie tussen COMSOL, iCP en PHREEQC speciaal voor het modelleren van minerale neerslag in een reservoir.

PHREEQC-module.

Opzetten van PHREEQC met domein-invoerbestanden voor de begrenzing van het reservoir en geo-database. Voor alle parameters nemen we de gegevens op voor, ionengehalte, temperatuur, druk en pH:

- **BoundaryWater:** Het grensbestand beschrijft de fysio-chemische eigenschappen van water dat in het reservoir wordt geïnjecteerd.
- **ChemicalDomain:** het domein-invoerbestand beschrijft het gebied rond het boorgatgebied. Hierbij nemen we aan dat op tijdstip=0s de watersamenstelling in evenwicht is en dezelfde temperatuur heeft als de temperatuur van het geïnjecteerde water. Dus alleen neerslagreacties van het verwerkte water na de processen aan het oppervlak worden meegenomen.
- **Database:** In dit rapport is de database samengesteld uit verschillende bronnen voor water data, genoemd in Werkpakket 1. Relevant zijn gegevens over kinetiek van oplossing, neerslag van mineralen en gegevens over oplosbaarheidsconstanten.

COMSOL-module.

- **Parameters:** Parameterdefinitie en waardebepaling specifiek voor in-situ condities, zodanig uitgevoerd dat eenvoudige wijziging van berekeningen en beperkingen mogelijk is.
- **Geometrie:** gemodelleerde geometrie voor de straal binnen de cirkel van het interessegebied, rond het nabije boorgat, in een 1D asymmetrische geometrie voor radiale stroming.
- **Wet van Darcy:** Implementatie van de variabelen die al zijn gedefinieerd onder "parameters". Een vaste druk gelijk aan de begindruk op de cirkelrand. Bij de inlaat gaan we uit van een vaste instroomsnelheid.
- **Molal Solute Transport:** invoerparameters voor ionentransport in het retourwater; advection op basis van darcy flow en diffusie in m^2/s .
- **Mesh:** Maasverdeling met een fijn raster bij het injectiepunt dat wordt grover naar buiten toe.
- **Study:** Onder studie bepalen we de volgorde van de verschillende berekeningen; Onder stap 1 worden eerst de vergelijkingen voor transport (Darcy) en molen opgeloste stoffen berekend, gevolgd door stap 2 waar de resultaten uit PHREEQC worden geïmporteerd.

De iCP interactieve module.

Deze module brengt tijd- en volumestappen tussen PREEQC en COMSOL op één lijn. De interactie tussen beide programma's wordt gecontroleerd middels een massabalans door tijd en ruimte zoals vooraf gedefinieerd.

- **Tijdstappen:** Stapgroottes kunnen worden gedefinieerd door het aantal stappen en de eindtijd van de simulatie; met andere woorden, intervallen zijn omschreven.

- Mineralen en ionen: mineralen zijn opgenomen onder activiteiten, ionen onder molaliteiten en mineralen onder verzadigingsindices, kinetische reactanten en kinetische reactanten delta. Verder kan de simulatie-output ook pH, Pe, temperatuur, ion sterkte en lading includeren.

Werkpakket 3: Demonstratie en implementatie

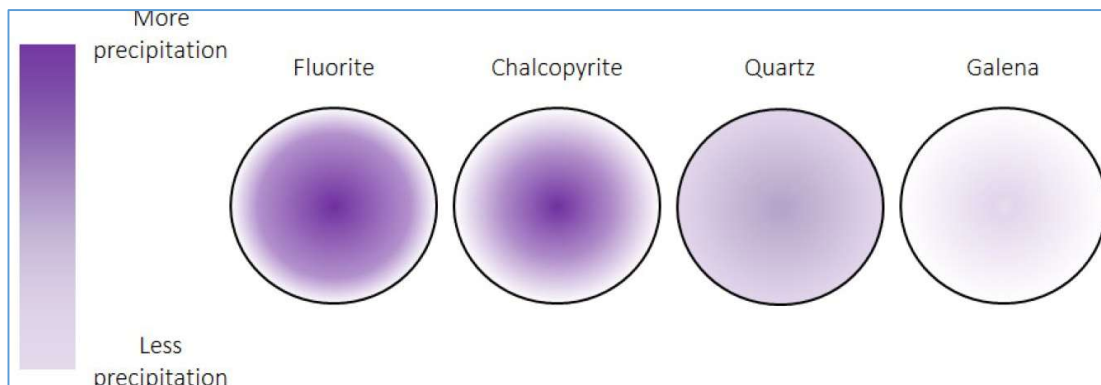
Case studies voor een veldtest en validatie

Synopsis van een veldcasus:

We hebben een laag-enthalpie geothermische site in het West-Nederlands Bekken gemodelleerd met vermijding van redoxreacties door gebruik van voornamelijk glasvezel versterkte pijpen. De warmtewisselaar bestaat uit een niet-corroderend metaal, maar plaatselijk komt pekkel in contact met staal. Er worden geen corrosieremmers of andere chemicaliën aan het water toegevoegd, waardoor een relatief ongestoorde mineralisatie in het systeem kan ontstaan.

Aan het oppervlak

Zoals weergegeven in figuur 2, werd geothermisch water verzameld en geanalyseerd op 5 punten langs het oppervlakte in de procesfaciliteit. Ontgassing, warmtewisseling en filtering veranderen de watersamenstelling en met temperatuur creëren deze variaties vaste stoffen. Er zijn tien watermonsters verzameld en geanalyseerd met behulp van IC- en ICP-MS-analyses om de ion-concentraties te bepalen. Er zijn geen trends gevonden voor concentraties over het productie - injectie traject.



Figuur 4: Voorbeeld van mineralisatie in de injectieput met een kleurgradatie die de mate van neerslag weergeeft binnen de straal van 1 m rond het injectiepunt. De kleuren concentraties representeren hier niet een absolute schaal, maar zijn relatief per mineraal.

Op injectiediepte

Numerieke modellering van minerale neerslag nabij het injectiepunt is gebaseerd op het de conditie van het water. Daarnaast is er een referentielijst van de mineralen waarmee het water oververzadigd is. De mineralen met een SI > 0 in de injectieput worden gebruikt voor minerale neerslag in het nabije boorputgebied, en wel over een periode van één porievolume (400 seconden); zie figuur 4. In dit voorbeeld karakteriseren we de geprecipiteerde mineraalconcentraties van fluoriet, chalcopyriet, kwarts en galeniet in een straal van 1 m rond het injectiepunt. Aan de hand van de kleurconcentraties definiëren we concentraties, waarbij donkerpaars wijst op meer minerale neerslag en lichtpaars op minder neerslag .

Beslissingsboom

We hebben twee beslissingsbomen samengesteld, gebaseerd op gegevens van filterresiduen en PHREEQC-modelleringsresultaten

De filterresiduen hebben XRD/XRF-analyses ondergaan om het mineraalgehalte en de bulksamenstelling van de element-oxiden te bepalen. De verschillende filters verzamelen verschillende mineralen gebaseerd op het p,T-verloop van productieput naar injectieput. Bijvoorbeeld; indien er een onaanvaardbare hoeveelheid filterresidu in de productiefilters zit, kan worden onderscheiden of de vaste stoffen afkomstig zijn uit de productieput of dat ze gevormd zijn na de warmtewisselaar. De SKID kan voor bepaling van deze mineraal-generaties tussen de productieput en de ontgasser worden geplaatst.

PHREEQC-modelleringsresultaten gevenverzadigingsindexen (SI) van de verschillende mineralen in de database (die volledig zou moeten zijn) en die zijn geverifieerd m.b.v. experimenten onder vergelijkbare P,T-omstandigheden. De verzadigingsindex definieert minerale superverdiging - en daarmee - mineralisatie of niet. Bij een eerste $SI > 0$ begrijpen we welke fysische processen het water over-verzadigen. Dit geeft informatie voor een mitigatiestrategie.

Opmerking: De beslissing hangt af van de informatie uit de mineraalmenstelling van de injectieput, maar ook van de PHREEQC-mineralenlijst. Ze kunnen verschillen vanwege; a) onjuiste watersamenstelling; b) een onvolledige of onjuiste database in PHREEQC; c) verontreiniging van de kalksamenstelling met originele vaste stoffen die oorspronkelijk uit de ondergrond zijn geproduceerd; d) onjuiste mineraalsamenstelling van injectieput, en; e) mineralen die ontstaan aan het oppervlak rond de warmtewisselaars. Derhalve worden verdere studies voorgesteld om gebruik te maken van een lokaal evenwicht en kinetische database van relevante mineralen. Dit door experimenten uit te voeren op het geproduceerde water onder veld- en procesomstandigheden. Met andere woorden; een beter gedefinieerde watersamenstelling langs het gehele traject van productie tot injectie, inclusief de stroomsnelheid en p,T-geschiedenis.

Ontwikkeling van een corrosie en mineralisatie Skid

Samenvatting.

De analyserandapparatuur op de SKID is geselecteerd en technische implementatiekwesties, zoals parallele data-acquisitie, robuustheid en beschikbaarheid, zijn de belangrijkste onderwerpen voor potentiële problemen.

Normaal gesproken worden alle fysieke gegevensverzameling en chemische analyses gedaan op basis van monsters die zijn verzameld op verschillende plaatsen in de geothermische faciliteit. Zij worden geanalyseerd onder oppervlakte condities of opnieuw verwarmde zoals tijdens bemonsteringsomstandigheden. Het geeft een goed maar niet precies overzicht van de mineralen en vloeistofsamenstellingen in de ondergrond en filters. Nu is het monitoren van de geothermisch water, van productieput tot injectieput, mogelijk gemaakt door de constructie van een verplaatsbare unit die de fysio-chemische parameters van het water online kan controleren. Er is een modulair leidingsysteem ontwikkeld met zeven mogelijkheden voor het aansluiten van meetinstrumenten.

Opbouw van de Skid.

De Skid volgt een buisontwerp om corrosie en kalkaanslag te onderzoeken door middel van discrete metingen. Nu is het mineralisatie deel ontwikkeld dat als een permanent meetstation langdurig data kan aanleveren. De Skid wordt in de bovengrondse installatie aangesloten op het systeem door middel van een T-aansluitingen. Het bestaat uit een frame, leidingwerk en een pomp. De connecties zijn geplaatst bij controlepunten tussen de productie- en injectieput, zoals gedefinieerd in figuur 2, maar zal meestal tussen de ontgasser en de filters worden geplaatst (Figuur 5 B). De skid-tube is gecoat met CP PHENOLICS® 210 Red Series, een door warmte uitgeharde duroplast-coating die bestand is tegen sterk alkalische tot zwak zure vloeistoffen. De zeven doodlopende eindstukken worden gebruikt voor de implementatie van de apparatuur om vloeistof eigenschappen en de faciliteits-omstandigheden te meten, d.w.z. druk, temperatuur, pH-waarde, stroomsnelheid, elektrische geleidbaarheid en dat over specifieke tijd-bereiken. Zo kunnen monsterresultaten van verschillende locaties binnen de doublet worden geanalyseerd en vergeleken om na te gaan of en hoe de watersamenstelling kan zijn veranderd.

De randvoorwaarden voor bedrijfsvoering in een geothermisch systeem.

Zoals weergegeven in figuur 5, loopt de Skid parallel aan de hoofdleiding die en is aangesloten via drukkleppen. Om veiligheidsredenen en specificaties van de meetapparatuur zijn de vloeistofdrukken lager dan de druk bij de productieput. De watertemperatuur is de belangrijkste parameter om te meten; een pomp zorgt ervoor dat de parallelle leiding een vergelijkbaar debiet heeft als de hoofdleiding. Met andere woorden, de druk en temperatuur in het meetgedeelte worden onder respectievelijk maximaal 10 bar en maximaal 95°C gehouden bij een gelijk debiet. Bovendien helpt een expansievat om, indien nodig, het water in het parallelle buizensysteem onmiddellijk te ontgassen. Nieuwe evenwichten door veranderende partiële drukken zijn minimaal. In wezen zijn alle opgeloste ionen - niet gerelateerd aan onopgeloste gassen - in het geothermische water bepaald en kunnen worden gebruikt voor voorspelling van mineralisatie c.q. verstopping m.b.v. het model, zoals uitgelegd in WP1 en WP2.

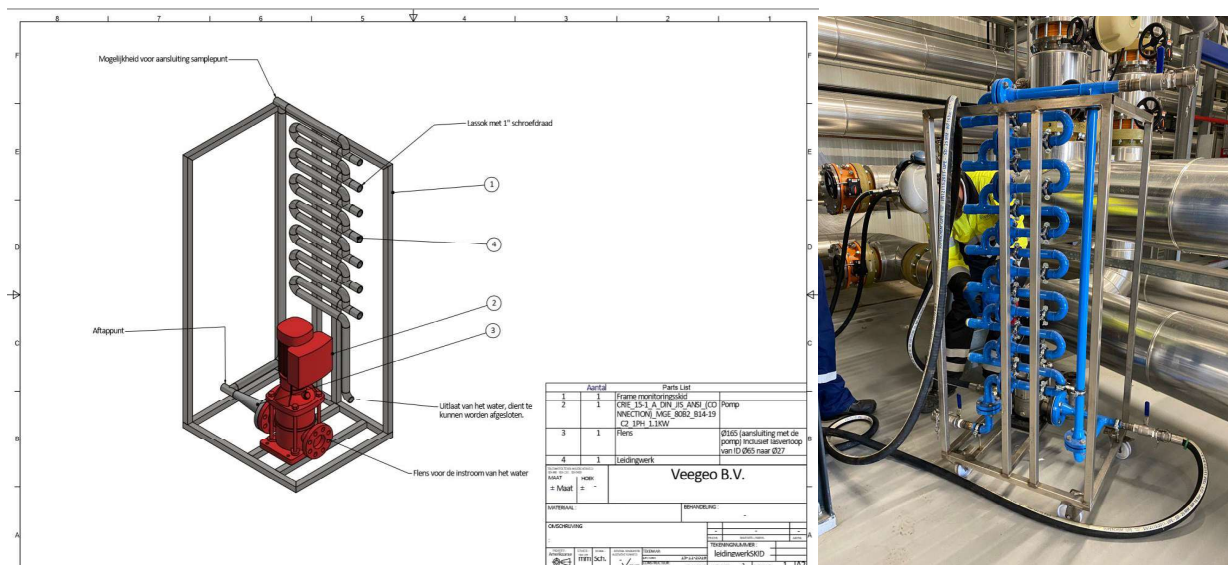


Figure 5 A,B: Schema van de unit (inks) en plaatsing naast de oppervlakte installatie (rechts)

Shortlist van geschikte meetapparatuur.

De volgende meetmogelijkheden zijn overwogen:

- **Temperatuurmeetinstrument:** Een permanente temperatuursensor is nodig voor het meten van de watertemperatuur langs de leiding en juist daar waar temperatuurdaling optreedt.
- **Manometer:** Bovenin het systeem, na de ontgassingsunit (expansievat). Door het systeem treedt drukval op en kan de potentiële mineralisatie beïnvloeden.
- **pH-meetinstrument:** Het meten van de pH op verschillende locaties van de geothermische installatie geeft een beter beeld van de totale ion-concentratieverandering door mineralisatie door het systeem. Dit kan zowel in het ontgaste als originele water.
- **Doorstrommetingen:** Het Coriolis meetinstrument is een dichtheid/fluxmeter die de vloeistof-massastroom, volumestroom, gas-massastroom en vloeistofdichtheid meet. Het geeft een beter begrip van de vloeistofdichtheid en viscositeit.
- **Meetinstrument voor elektrische geleidbaarheid:** het meet door middel van potentiaal en/of stroom het aantal ionen of totaal opgeloste vaste stoffen in het water. In combinatie met de dichtheid en de ISE (Ion Selective Electrodes) kan nauwkeuriger worden gekeken naar de ion variatie en concentratie tijdens de stroming door de geothermische faciliteit.
- **Zuurstofsensoren of Redoxpotentialmeter:** Deze wordt gebruikt om te meten of de vloeistof zich in anaerobe of zuurstof rijkere omstandigheden bevindt. Een waarde onder 0 geeft aan dat er geen zuurstof is. Notitie; Het water kan ook sulfaat en/of nitraat bevatten.

□ Beschrijving van de behaalde resultaten, de knelpunten en het perspectief voor toepassing

Resultaten

Klimaatbeheersing is gebaseerd op CO₂-reductie door duurzame energieproductie, energiebesparingen en CO₂-afvang. Ons project omvat de eerste twee als onderdeel van de energietransitie. DIMOPREC richt zich op kostenbesparende technieken, bodemsanering en op betaalbare en duurzame warmtevoorziening.

- We hebben een modelleringstool en -procedure ontwikkeld om verstoppingen en slechte prestaties van het reservoir/de put te detecteren, te beheersen en te voorkomen.
- We hebben richtlijnen ontwikkeld om met de chemische complexiteit van mineralisatie om te gaan, d.w.z.:
 1. Verbetering van geochemische modelvoorspellingen door de onzekerheid te verminderen door effectieve geochemische informatie op te nemen;
 2. Ontwikkeling van een tool en een voorspellend verstoppingsmodel op veldschaal en het afbakenen van een veiligheidsraam om de operationele en milieurisico's te verminderen.
 3. Kosteneffectieve aardwarmteprojecten door vermindering van verstopping, d.w.z.:
 - Beperkt verbruik van dure en milieuonvriendelijke inhibitors.
 - Verbetering van de putprestaties, zowel injectiviteit als productiviteit, waardoor hogere productiesnelheden worden verkregen bij hetzelfde energieverbruik.

We raden aan om zowel het mineralisatiemodel als de Skid-configuratie te gebruiken als basis voor de ontwikkeling en het gebruik van het DAP-bronpaar. Hun bijdrage aan langetermijn-monitoring en -voorspelling is essentieel voor het verbeteren van de zekerheid van aardwarmtebronnen en systeemintegriteit.

- De mineralisatie van radioactief lood was een spin-off door het nieuwe model te gebruiken. Het probleem is benoemd en gekarakteriseerd in een technisch rapport dat beschikbaar is in de TU-Delft repository.

Voor een serieuze benadering van dit milieuonderwerp bevelen we aan een aparte, meer diepgaande studie met betrekking tot radioactieve loodtracering in relatie tot de geologisch situatie en burial history. Het Nederlandse bedrijfsleven en kennisinstellingen moeten hieraan meewerken.

- Een mogelijke economische en strategische inventarisatie van lithiumconcentraties was een spin-off die werd geïnitieerd naar aanleiding van een Nederlandse aardwarmte-analyse. Het onderwerp is benoemd en gekarakteriseerd in een rapport dat beschikbaar is in de TU-Delft repository.

Voor een serieuze benadering van dit economische en strategische onderwerp bevelen wij een afzonderlijke, meer diepgaande studie aan naar de definitie van "lithiumconcentraties in relatie tot het geologisch voorkomen en de burial history". Het Nederlandse bedrijfsleven en kennisinstellingen moeten hieraan meewerken.

Ondanks de COVID-vertraging van 6 maanden hebben we alle werkpakketten kunnen afronden en drie veelbelovende spin-off-activiteiten kunnen creëren.

□ Beschrijving van de bijdrage van het project aan de doelstellingen van de regeling

Duurzame energiehuishouding

Als eerder aangegeven, is de grote mate van beschikbaarheid van overtollige warmte goed inzetbaar niet alleen voor agrarische doeleinden, maar maakt doorkoppeling met restwarmte naar openbare gebouwen en woningblokken het strategisch gebruik van een doublet nog efficiënter. Daarbij wordt meer warmte gebruikt waardoor de temperatuur val van het water lager kan worden. Kouder water betekent meer mineraalneerslag. Voorspelbaarheid van de plaatsen waar, de intensiteit van mineralisatie en de soort mineralen, kunnen worden gelokaliseerd, geanalyseerd en worden aangepakt m.b.v. bijvoorbeeld inhibitors. Dit vergroot de productiviteit in volume, in bedrijfsduur en in pompkosten, ofwel; een verbeterde kosteneffectiviteit; veiliger en effectievere operaties, en; in het kader van de verduurzaming een sterk maatschappelijk draagvlak.

Versterking van de kennispositie

De samenwerking tussen het bedrijfsleven en kennisinstituten heeft er toe geleid dat veldervaring en theorie zijn gecombineerd met als resultaat een geochemisch meetsysteem en een interpretatiesysteem om verstopping te voorkomen. Het geleverde resultaat is openbaar en kan worden overgenomen door derden en zo nodig worden aangepast naar de geologische situatie van een geothermisch reservoir. Het Dimoprec-programma kan als monitoring tool worden uitgerold naar doubletten met veel mineralisatieproblemen. Er zijn al gesprekken met DAP, het aardwarmteprogramma aan de TU-Delft, om één of meerdere Skids te gebruiken om het systeem permanent te monitoren.

□ Spin off binnen en buiten de sector

Spin off binnen de sector

1. De toepassing van het model voor casus specifieke mineralisatie voor zware mineralen met mogelijke radioactief materiaal.

Een dataset die is opgesteld voor het identificeren van zware mineralen met een relatie tot opname van radioactieve isotopen, is gekoppeld aan mineraal vorming. Het kan zich kan ophopen in filters en buizen van de geothermische faciliteit en een operationele hindernis veroorzaken; het materiaal moet met de grootste aandacht worden verwijderd. Bovendien kan verstopping ongewenste drukstijgingen over de filters veroorzaken, wat kan leiden tot een toename van procesonderbrekingen. Door gebruik te maken van ons model voor een gesloten laag-enthalpiesysteem en voor ontgast geothermisch water, is nagegaan welk deel van de zware mineralen (PbS) afkomstig is uit het reservoir en welk deel is gecreëerd aan het oppervlak (respectievelijk 78 gew.% en 22 gew.%). Een gedetailleerd rapport wordt opgeslagen in de repository van TU-Delft: "A case study of Pb-scaling in the West Netherlands basin", door ir. N. Essaf.

2. Spin-off voor chemische samenstellingen die relevant zijn voor secundair economische mijnbouw.

In samenwerking met EBN, Deltares en de Nederlandse geothermische industrie hebben we gekeken naar het commerciële ionengehalte van geothermisch geproduceerde water met zeldzame aarden zoals lithium. Soms zijn deze strategische elementen beschikbaar in economische hoeveelheden. We zijn begonnen met een inventarisatie van de ionen samenstelling in geothermisch water in Nederland, door de tijd heen. Uit vijftig wateranalyses van 13 geothermische velden is aangetoond dat opgelost lithium en andere metalen in dusdanige hoeveelheden aanwezig zijn, dat 'mijnbouw' op een milieuvriendelijke manier mogelijk kan zijn. Een gedetailleerd rapport is opgeslagen in de repository van TU-Delft: "Geothermal mining; the potential for environmentally friendly extraction of valuable components from geothermal brines in the Netherlands", door M.E. Biagini.

Deze spin off is in lijn met een Tweede Kamer een motie tot aanpassing van de mijnbouwwet geothermische energie winning (Kamerjaar 2021-2022, motie 35.531-28). Voor details, zie supplement 3: Motie-kst 35531-28.

3. Spin off: roll-out van de systemen: Zie de eerdere vermelding van het gebruik van Dimoprec resultaten voor het DAP-programma.

Spin off buiten de sector

In de woningbouw kunnen de Dimoprec resultaten worden gebruikt bij ondiepere verwarmingssystemen in de nieuwbouw. Ook bij warmte-koude opslag en ondiepe seizoensopslag zal mineralisatie en verstopping optreden a.g.v. temperatuurwisselingen. Wellicht kan het systeem worden aangepast voor gebruik in warmte grids t.b.v. woningen en verzamelgebouwen.



Overzicht van openbare publicaties over het project en waar deze te vinden of te verkrijgen zijn

Alle data zijn aanwezig op aan de TU-Delft gerelateerde sites:

- De Dimoprec project pagina kan worden gevonden onder: <https://www.tudelft.nl/citg/over-faculteit/afdelingen/geoscience-engineering/research/geothermal/geothermal-science-and-engineering/research/dimoprec>
- Het DIMOPREC report met beschrijving van het model kan worden gevonden onder: https://pure.tudelft.nl/admin/files/132491173/Dimoprec_report.pdf
De appendices van het Dimoprec model rapport staan bij "4TU Research Data" onder supplementaire data: <https://doi.org/10.4121/21187270>
- De rapportage m.b.t. Lithium geothermal mining staat onder: https://pure.tudelft.nl/admin/files/132491322/Minor_Geothermal_Mining_6.9.22_Biagini_Maria_Erica.pdf
- De rapportage m.b.t. zware mineralen met mogelijk radioactieve mineralisatie van ir N.Essaf, wordt geplaatst in de TU-Delft repository onder: <https://www.tudelft.nl/library> bij de TUD-publicaties.

Waar en tegen welke prijs zijn meer exemplaren van dit rapport te bestellen

Exemplaren van dit rapport en bijlagen zijn leverbaar als PDF en als data format files. Alles is opgeslagen in en te downloaden uit de bibliotheek van de TU-Delft en onder de "4TU Research Data". Zie "openbare publicaties".

Contactpersonen voor meer informatie

- General project information: Karl-Heinz Wolf, k.h.a.a.wolf@tudelft.nl
- Mineral model development: Ahmed Hussain, a.a.a.hussain@tudelft.nl, Bernhard Meulenbroek, B.J.Meulenbroek@tudelft.nl, Wouter van der Star, Wouter.vanderStar@deltares.nl;
- Skid configuratie: Han Claringbould, han.claringbould@veegeo.nl

ERKENNING

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie en uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.