



SUCCEED

**Final Report voor RVO
RVO 18009**

**ACT - Era-Net Energy Call Act
ACT –Accelerating CCS Technologies Project No: 299670**

Openbare Eindrapportage

February 2024

Hoofdonderzoekers:

Dr. K-H.A.A. Wolf, Dr. R. de Kunder, Dr. A. Barnhoorn, Dr. D. Draganov, Dr. M. Janssen





Openbare eindrapport van het SUCCEED project

Het openbare eindrapport beschrijft de activiteiten en resultaten van het project en omvat de volgende onderwerpen:	
Thema	Pagina
1. Project informatie	4
<input type="checkbox"/> Projectnummer <input type="checkbox"/> Projecttitel <input type="checkbox"/> Penvoerder en medeaanvragers <input type="checkbox"/> Projectperiode	
2. Inhoudelijk eindrapport	
<input type="checkbox"/> Samenvatting van de uitgangspunten en de doelstelling van het project en de samenwerkende partijen.	6
<input type="checkbox"/> Beschrijving van de behaalde resultaten, de knelpunten en het perspectief voor toepassing;	9
<input type="checkbox"/> Literatuur: Outputactiviteiten gerelateerd aan DUT en SM.	14
<input type="checkbox"/> Beschrijving van de bijdrage van het project aan de doelstellingen van de regeling (duurzame energiehouding, versterking van de kennispositie)	18
<input type="checkbox"/> Spin off binnen en buiten de sector	18
<input type="checkbox"/> Overzicht van openbare publicaties over het project en waar deze te vinden zijn;	19
<input type="checkbox"/> Vermelding waar en tegen welke prijs meer exemplaren van dit rapport te bestellen zijn;	20
<input type="checkbox"/> contactpersoon (personen) voor meer informatie	20
<input type="checkbox"/> Dankbetuigingen / Acknowledgements	3, 20
<i>LET OP: vanwege het internationale karakter van de medewerkers, onderzoekers en onderzoeken van de partner is er een vertrouwelijk rapport in het Engels geschreven.</i>	

Dankbetuigingen

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

Dankbetuigingen II

SUCCEED wordt gefinancierd via het ACT-programma (Accelerating CCS Technologies, Horizon 2020 Project nr. 294766). Financiële bijdragen van het Department for Business, Energy & Industrial Strategy UK (BEIS), de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO), de Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) en onze onderzoekspartners Orkuveita Reykjavíkur/Reykjavik Energy IJsland (OR) en Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale Italy (OGS) worden dankbaar erkend.



Project informatie

<input type="checkbox"/> Project code	RVO 18009 in the ACT - Era-Net Energy Call Act ACT –Accelerating CCS Technologies” Project No: 299670
<input type="checkbox"/> Project titel	SUCCEED - Synergetic Utilisation of CO2 storage Coupled with geothermal Energy Deployment
<input type="checkbox"/> Project administratie en partners	<ul style="list-style-type: none"> - Delft University of Technology – Administrator - Seismic Mechatronics - Veegeo BV – Observing Partner
<input type="checkbox"/> Project periode	01/09/2019 – 01/08/2022 en twee keer verlengd tot 01/03/2024

Binnen het SUCCEED ACT-programma zijn de contracterende partijen:

Partner	Afkorting	Land
Imperial College London	(ICL)	Groot-Brittannië
Middle East Technical University	(METU)	Turkije
Zorlu Enerji Elektrik Uretim AS	(Zorlu)	Turkije
Technische Universiteit Delft	(DUT)	Nederland
Silixa Limited	(Silixa)	Groot-Brittannië
Seismic Mechatronics BV)	(SM)	Nederland
Orkuveita Reykjavíkur	(OR)	IJsland
OGS	(OGS)	Italië

Voor het Nederlandse deel van het programma zijn de contractpartijen:

Partner	Land	Status
Technische Universiteit Delft	Nederland	Actieve deelnemer
Seismic Mechatronics BV	Nederland	Actieve deelnemer
Veegeo BV (Nu Sproule BV)	Nederland	Waarnemer voor Nederlandse stakeholders

□ **Actieve partners, de bijdragen en expertise.**

Actief deelnemende projectleden	Rolverdeling
Technische Universiteit Delft (DUT)	
Dr. K-H.A.A. Wolf DUT-CEG	<i>Associate Professor for Petrophysics/Projectcoördinator voor Nederland.</i> <ul style="list-style-type: none"> Onderzoeker op het gebied van petrofysica, petrografie, geologie, reservoirtechniek en beeldanalyse. Communicatie met ICL, OR, METU, Zorlu en SM over geotechnisch experimenteel werk, veldwerkprogramma's en vertalingen van veld-/laboratoriumgegevens.
Dr. D. Draganov DUT-CEG	<i>Associate Professor for Geophysics</i> <ul style="list-style-type: none"> Verantwoordelijk voor het toegepaste geofysica-gedeelte van het veldwerk, d.w.z. de implementatie en het gebruik van de vaste lijnen, kabelplanning en organisatie. Hoofdonderzoeker voor theorieontwikkeling en de dataverwerking van de conventionele seismische data en glasvezeldata verkregen tijdens de veldwerken. In samenwerking met Dr. M. Janssen het uitvoeren van grootschalige boorsimulatorexperimenten. Nauwe communicatie over alle geofysica-activiteiten met ICL, SM, Silixa en OGS.
Dr. A. Barnhoorn Associate Professor DUT-CEG	<i>Associate Professor for Petrophysics/Rock-mechanics, director of the DUT-CEG geoscience and engineering laboratory.</i> <ul style="list-style-type: none"> Verantwoordelijk voor steenbemonstering tijdens de veldsessies, monstervoorbereiding voor laboratoriumwerk bij DUT, ICL en METU. In samenwerking met Dr. M. Janssen, verantwoordelijk voor alle laboratoriumexperimenten.
Dr. M. Janssen DUT-CEG	<i>PD and principal researcher</i> <ul style="list-style-type: none"> Verantwoordelijk voor monstertransport naar Delft, monstervoorbereiding, distributie van pluggen en monsters naar de relevante partners. Verantwoordelijk voor alle mechanisch-akoestische experimenten, voorbereiding en gebruik van de uni/tri-axiale cellen en boorgatsimulator. Uitvoeren van alle gerelateerde experimenten en datavaliditeitspraktijken. Lead voor alle publicaties, presentaties en rapportages.
J. van den Berg, DUT-CEG	<i>Principal Technician</i> <ul style="list-style-type: none"> Verantwoordelijk voor seismisch veldwerk, dat wil zeggen het voorbereiden en implementeren van geofoonlijnen, het uitvoeren van de communicatie met SM, Silixa, OGS en OR. Het verzorgen van de monitoring en data-acquisitie. TU-veldtechnicus voor de eVibe. Laboratoriumondersteuning voor monstervoorbereiding en experimentele apparaatconstructies.
M.Friebel TU-Delft, CEG	<i>Principal Technician</i> <ul style="list-style-type: none"> Verantwoordelijk voor de ontwikkeling, bouw en experimentele ondersteuning van alle HP,T-apparatuur en opstellingen die in het project worden gebruikt. Technische veldondersteuning tijdens veldseismiek en monitoring.
Ing. K.Heller TU-Delft, CEG	<i>Principal Technician</i> <ul style="list-style-type: none"> Verantwoordelijk voor petrofysische metingen en datavalidatie.
Ing. J.van Meel and Ing. E. Meijvogel TU-Delft, CEG	<i>Principal Technicians</i> <ul style="list-style-type: none"> Verantwoordelijk voor alle CT-scans en gerelateerde dataverspreiding tussen de partners.
S. Hassing Elara Redondo Garcia	<i>MSc-students</i> <ul style="list-style-type: none"> Voor passieve monitoring en interferometrie Voor monster petrofysica en petrologie op IJslandse gesteente

Seismic Mechatronics (SM)	
R. de Kunder MSc. SM	CEO <ul style="list-style-type: none">• Coördinator voor veldwerkactiviteiten, tijdschema's, apparatuur en monitoring.• Communicatie met ICL, DUT, OGS, OR en Silixa voor de seismische monitoring-infrastructuur en type metingen.
J. Bos SM	CFO <ul style="list-style-type: none">• Verantwoordelijk voor materieel- en materiaaltransport.• Budgetcontroller en inkoper van onderdelen voor de nieuw ontwikkelde en gebouwde eVibe.
W. Roefs SM	Technician-developer <ul style="list-style-type: none">• Software designer voor de nieuwe eVibe.
Ing. G. van Otten SM	Construction and field technician <ul style="list-style-type: none">• Technisch constructeur van de Evibe.• Field engineer voor de Evibe seismische bron, broncontrole, supervisie generator en telehandler bediening tijdens monitoring.
L. Koorneef SM & MI- Partners BV	Principal technician <ul style="list-style-type: none">• Senior source operator en apparatuurontwikkelaar (E-design).

□ Samenvatting van de uitgangspunten en de doelstelling van het project en de partijen waarmee is samengewerkt.

Introductie

Het SUCCEED-project is een gerichte innovatie- en onderzoeksactiviteit welke tot doel heeft de ontwikkeling van CCUS via transnationale samenwerking te bevorderen. Het is een industrieel CCUS-project, dat zich richt op CO₂-gebruik en -opslag. Het profiteert van de bestaande faciliteiten voor de productie van geothermische velden in Kizildere in Turkije en Hellisheiði in IJsland. Het project heeft tot doel de toepassing van CCUS-technologie te versnellen en volwassen te maken door op veldschaal innovatieve meet-, monitoring- en verificatietechnologieën te ontwikkelen, te testen en te demonstreren. Deze methoden kunnen worden gebruikt in de meeste geologische CO₂-opslagprojecten. Veldwerk en laboratorium zijn sterk met elkaar verweven om nieuwe en bestaande geofysische, techno-geologische en geochemische technieken op het gebied van seismische bronnen en registratiemethoden te ontwikkelen en te verbeteren. Verbetering van monitoring, data-acquisitie en data-overdracht door de tijd en vertaling naar reservoir- en milieumodellen, en de resolutie van – in dit geval – injectie van CO₂ voor opslag en de reservoirkwaliteit van geothermische reservoirs. Samenwerking tussen experts uit de industrie en onderzoeksinstituten zorgde voor de kennis om dit programma te laten slagen.

Projectdoelen

Nederland is betrokken bij het “*Cursief gedrukte*” deel van de doelstellingen en prestaties.

De doelstellingen van het project zijn:

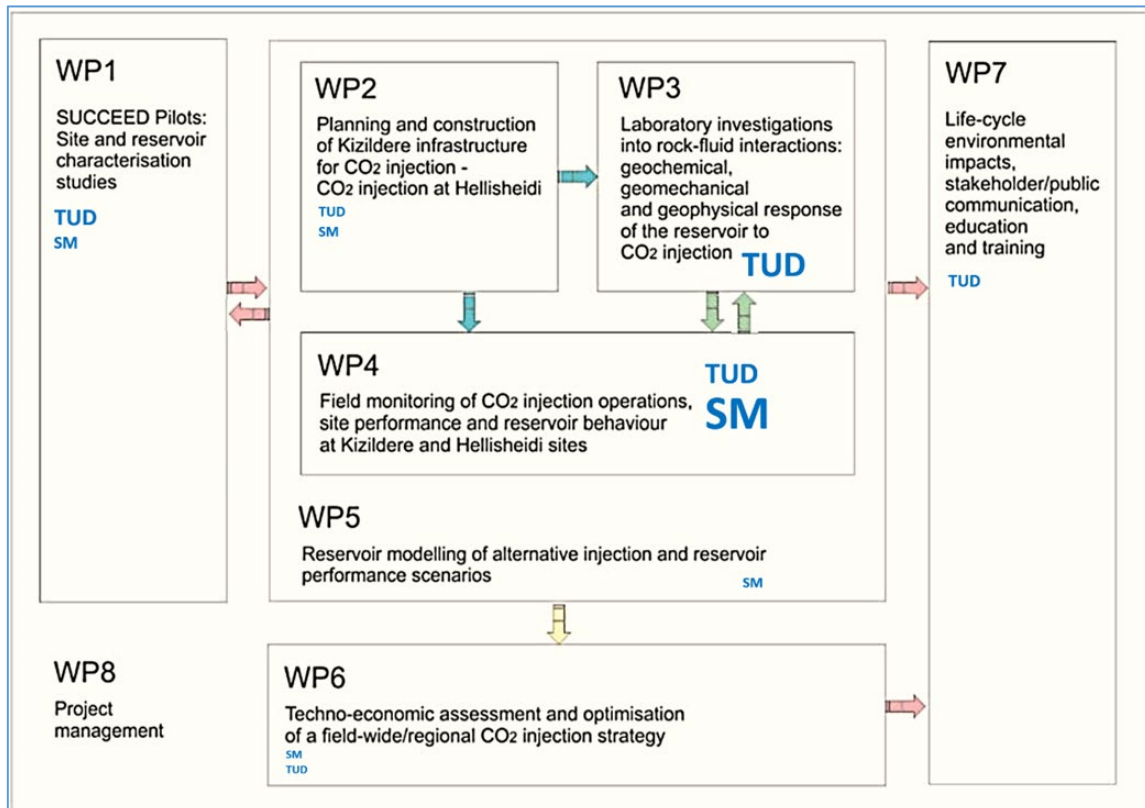
1. Het onderzoeken en aantonen van de haalbaarheid van het gebruik van geproduceerd CO₂ (dat momenteel in veel geothermische velden naar de atmosfeer wordt afgevoerd) voor her-injectie, Dit om de geothermische prestaties te verbeteren, terwijl ook het CO₂ wordt opgeslagen,
2. Om innovatieve monitoringtechnologieën verder te ontwikkelen, testen en demonstreren:
 - A. nieuw gedistribueerd glasvezel akoestisch detectiesysteem (iDAS) met een hogere signaal-ruisverhouding.
 - B. nieuwe permanente en goed repeterende trillingen (milieuvriendelijke) seismisch te genereren en te

monitoren m.b.v. de eVibe, en om semi-continue seismische monitoringcapaciteit te bieden, welke een aanvulling zal vormen op het reeds geïnstalleerde lokale micro-seismische monitoringnetwerk en de geïmplementeerde geochemische en tracer monitoringprogramma's in het veld.

3. Het testen en demonstreren van de industriële CCUS-mogelijkheden voor exploitanten van geothermische velden:
 - A. het behouden en verbeteren van de reservoirdruk als aandrijfmechanisme voor de geothermische vloeistof en het verbeteren van de geothermische prestaties,
 - B. de permeabiliteit en productiviteit van het reservoir te verhogen en tegelijkertijd de kalkaanslag door kunstmatige verzuring te onderdrukken.
4. Het benutten van een gunstige operationele veldomgeving, gefaciliteerd door thermisch en hydrologisch actieve geothermische bronnen die momenteel in productie zijn, voor het versneld testen van CO₂-gebruik, met zowel superkritische als opgeloste CO₂-injectie, voor reactief transport en opslag,
5. Om een echte veldomgeving te gebruiken voor het testen van superkritische en opgeloste CO₂-injectie in een reservoir en de geothermische energiesector te voorzien van de middelen om de huidige uitdaging van de klimaatverandering aan te pakken door middel van het gecontroleerd gebruik en de opslag van CO₂.

Wijze van aanpak

Hieronder presenteren we de interactie tussen de activiteiten en coördinatiestructuren voor het gehele programma (Figuur 1). Daarna worden, in het kort, kort de relevante bijdragen van de TU-Delft (DUT) en Seismic Mechatronics (SM) toegelicht. Anders dan in het oorspronkelijke voorstel was wederzijdse interactie tussen WP1, WP, WP4 en WP5, alsmede tussen WP3 en WP4, nodig om de logistieke en lock-downproblemen van COVID aan te pakken. Vertragingsproblemen werden opgelost door activiteiten waar nodig en mogelijk tijdig te wijzigen.



Figuur 1: Schematische interacties van alle werkpakketten binnen SUCCEED. De grootte van de blauwe DUT/SM-symbolen vertegenwoordigt de geschatte tijd gebruikt binnen en tussen de werkpakketten.

Werkpakket 1 - SUCCEED-pilots:

karacteriseringsstudies van locaties en reservoirs. Wij (voornamelijk TU Delft) hebben ons gericht op de karakterisering van de veldlocatie en het reservoir, en het construeren van een statisch reservoirmodel voor beide locaties. Bemonstering van gesteenten en kernen en een overzicht van eerdere veld-wijde seismische en geologische veldstudies zijn afgerond. Tijdens en na Covid wordt onderbroken kernanalyse voor de karakterisering van reservoirgesteenten (petrofysisch, petrologisch, geomechanisch en akoestisch) uitgevoerd voor pre-injectie monitoring van de geothermische prestaties als basis voor geochemische, geofysische en reservoirmodellering/interpretatie.

Werkpakket 2 - Planning en bouw van Kizildere-infrastructuur voor CO₂-injectie in Kizildere, CO₂ Injectie bij Kizildere en CO₂-injectie bij Hellisheiði.

SUCCEED concentreert zich op alle technische, operationele en infrastructurele kwesties die nodig zijn om veilige en gecontroleerde CO₂-injectie in het reservoir bij Kizildere mogelijk te maken, dat wil zeggen de selectie van de lay-out van de injectie- en monitoringputten; technische en operationele procedures, infrastructuur en implementatie van de CO₂-injectiefase(n). De opvolging van de CO₂-injectie op de Hellisheiði-site in IJsland in de CarbFix-projecten.

Werkpakket 3 - Laboratoriumonderzoek naar interacties tussen gesteenten en vloeistoffen: geochemische, geomechanische en geofysische reacties van het reservoir op CO₂-injectie.

Ons doel (voornamelijk DUT) was om de respons van marmer en basalt te karakteriseren, d.w.z. het superkritische CO₂ bij in-situ reservoir-omstandigheden, de seismische respons; (golfsnelheden, golfdemping), impact op stromingseigenschappen, geochemie en integriteit van het reservoirgesteente op verandering in sterkte. Het monstervolume is geschaald in kernen met een diameter van 40 mm tot 40 cm. De resulterende parameters worden ingevoerd in WP4 en WP5, voor interpretatie, kalibratie van gemonitorde gegevens en numerieke modellen. De resultaten worden gebruikt voor de veldevaluatie van vóór en na CO₂-injectie, alsmede voor de planning van injectiestrategieën op de lange termijn.

Werkpakket 4 - Veldmonitoring van CO₂-injectieoperaties, locatieprestaties en reservoirgedrag op de locaties Kizildere en Hellisheiði.

Het doel van het team was om de geïnduceerde veranderingen in veldparameters en bestudering van de geochemie en geomechanica van het geothermische veld. Bovendien wordt waar mogelijk het verspreidingsgedrag van de CO₂-pluim onderzocht door middel van verschillende, ter plaatse aangepaste monitoring-activiteiten aan het oppervlak en in de boorput. Standaard monitoringtechnologieën zoals druk-, temperatuur- en geochemische monitoring met tracers worden gecombineerd met nieuwe en innovatieve seismische monitoringtechnieken en hardware van de eVibe van SM en een iDAS-systeem (Silixa).

Werkpakket 5 – Reservoirmodellering van alternatieve injectie- en reservoirprestatiesscenario's.

Er worden pre- en post-CO₂-injectiesimulaties gemaakt van de veranderingen in reservoirdruk, geochemie en geomechanische reservoir eigenschappen. Modellen zijn gekalibreerd met behulp van historische en via het project verkregen monitoringgegevens. Het scheur/breukgedrag en het potentieel voor geïnduceerde seismiciteit bij verschillende injectie- en productie-scenario's worden onderzocht.

Werkpakket 6 - Techno-economische beoordeling en optimalisatie van een veld-brede en regionale CO₂-injectie strategie.

De uitkomsten van WP1 tot WP4 en het geïdentificeerde strategieën die de CO₂-injectie optimaliseren, met daarbij de potentiële CO₂-opslagprestaties en de productie van geothermische energie in het veld worden beoordeeld. Verschillende CO₂-injectiestrategieën, waaronder de selectie en plaatsing van injectieputten en injectiesnelheden, zijn onderzocht om de prestaties te evalueren in termen van lange termijn drukbehoud in het geothermische veld, terwijl de productie van geïnjecteerd CO₂ wordt geminimaliseerd. Deze WP bestudeerd ook de ontwikkeling en implementatie van een CO₂-transportinfrastructuur op regionale schaal voor gebruik bij

CO₂-injectie langs de Büyük Menderes Graben en het daaraan gelieerde regionale CCUS-potentieel in het gebied.

Werkpakket 7 – Milieueffecten gedurende de levenscyclus, communicatie met belanghebbenden/publiek, onderwijs, en opleiding.

Ten eerste weerspiegelt een levenscyclusanalyse (LCA)-model de technische processen om de schaalbaarheid van verbeterde geothermische en CCUS-systemen te beoordelen, hierbij rekening houdend met beperkingen op het gebied van milieu en hulpbronnen. Ten tweede richt de TU Delft zich op communicatie en onderwijsactiviteiten met belanghebbenden en het publiek, met betrekking tot de ontwikkelde CCUS technologieblauwdruk en de validatie van monitoringtechnieken. Ten tweede richt de TU Delft zich op communicatie- en onderwijsactiviteiten met belanghebbenden en het publiek met betrekking tot de ontwikkelde CCUS-technologieblauwdruk en de validatie van monitoring-, modellerings- en verificatiemethodologieën die van toepassing zijn op deze systemen.

Feitelijk is de TU Delft regionaal coördinator voor Nederland. De verantwoordelijkheden zijn::

- In WP1: Locatiekarakterisering in Turkije en in IJsland. Het uitvoeren van de gesteentebemonstering tijdens de veldwerkstudies, kernpreparatie en petrofysische, petrografische, mineralogische analyses, inclusief beeldkarakterisering.
- In WP3: Taak 3.1, de organisatie en uitvoering van de kleinschalige en grootschalige HPHT-experimenten kleine drukcellen en de boorgatsimulator. Dit is gedaan om de seismische respons en daaraan gerelateerde verandering in visualisatie van de reservoirgesteenten, waar CO₂ pekkel doorheen gaan vast te stellen.
- Ondersteuning van OGS bij de coördinatie van WP4 en verantwoordelijk voor het seismische veldwerk in IJsland en Turkije, en daarnaast voor het delen van de meeste seismische monitoringgegevens en verwerking en interpretatie in Taak 4.4
- TU Delft heeft bijgedragen geleverd aan de planning van de CO₂-injectie in Kizildere in WP2, evenals aan de taken in WP6 en WP7.

SM-verantwoordelijkheden:

- Het uitvoeren van substantiële activiteiten in Nederland, waarbij in hun onderzoeksfaciliteiten de systemen voor gebruik van een nieuwe seismische bron worden vervaardigd. Met andere woorden, het ontwikkelen en bouwen van de nieuwe eVibe als de seismisch actieve bron.
- Verantwoordelijk voor de bron, monitoring in het veld van CO₂-injectieoperaties op de locaties Kizildere en Hellisheiði en het uitvoeren van aan WP2 en WP4 gerelateerde geofysische onderzoek elementen van het werk.
- Het bedrijf heeft vanuit hun onderzoekconcepten bijgedragen aan het werk van WP2, WP5 en WP6 bij het ontwikkelen en construeren van de nieuwe bron en heeft met de resulterende kennis bijgedragen aan de modelleringsactiviteiten en het bepalen van putten en seismische lijnen voor monitoringdoeleinden.

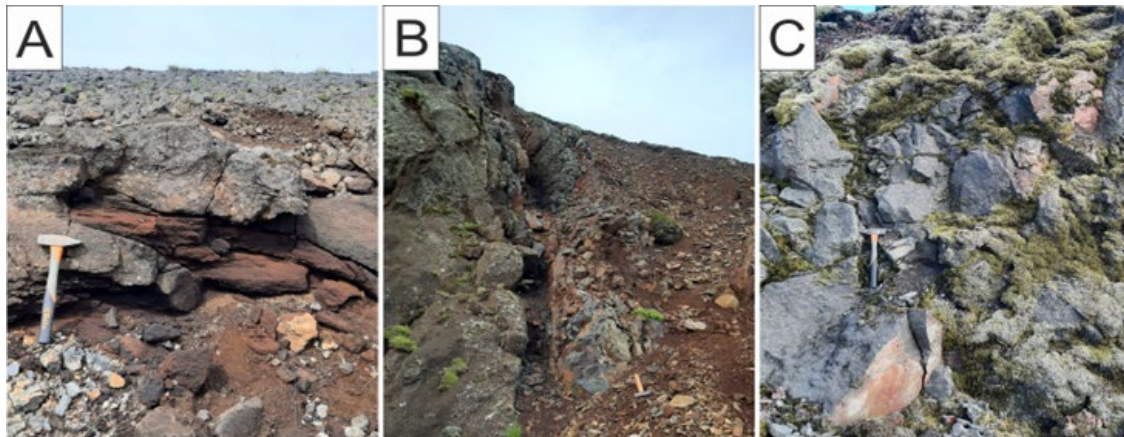
□ Beschrijving van de behaalde resultaten, de knelpunten en het perspectief voor toepassing.

Behaalde resultaten

Alle projectonderdelen zijn afgerond of bijna gerealiseerd, wat voor Nederland, dus TU Delft en SM, betekent dat:

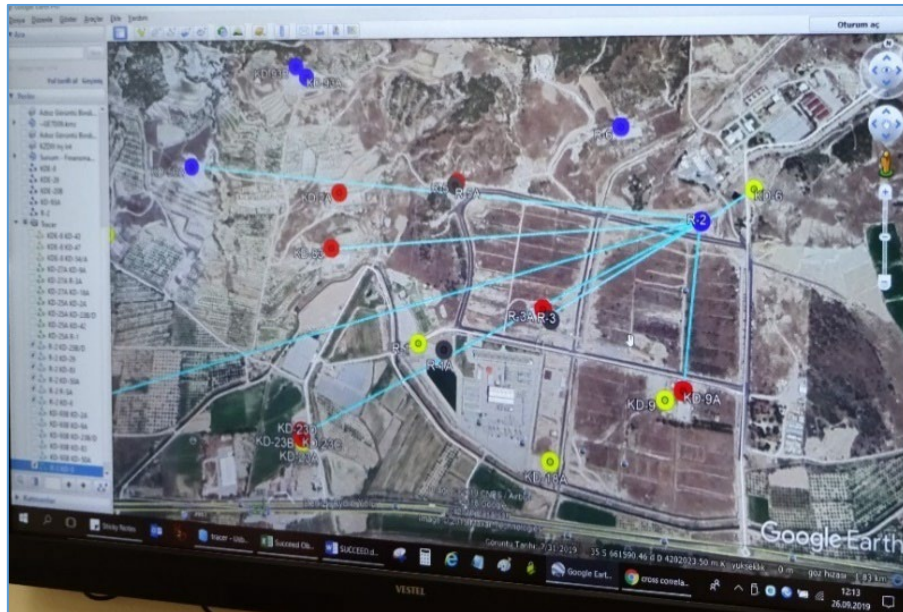
In **WP1**, voornamelijk DUT met SM, al het geotechnisch veldwerk op de locaties Hellisheiði en Kizildere zijn onderzocht. Aan de oppervlakte zijn de locaties voor de met twee componenten bekabelde geofoons (10 Hz) en de fiber optics kabel bepaald. Waar mogelijk werden ook opties voor aanvullende opname voorbereid met twee loodrechte lijnen van driecomponenten stand-alone geofoons (IJsland) en glasvezelkabels in twee boorgaten. Bovendien maakten geologische onderzoeken in de omgeving van de testlocaties het mogelijk om

het reservoir en de bovenliggende gesteenten te karakteriseren. Voor Turkije is twee ton aan representatieve monsters verzameld en naar Delft getransporteerd. Voor IJsland werd de bemonstering en het transport van gesteenten met 16 maanden uitgesteld en uitgevoerd na de Covid-lockdowns en de sneeuwperiode (Figuur 2). Alle monsters zijn uitgeboord en petrografisch, geomechanisch, geofysisch en petrofysisch geanalyseerd en ook verzonden naar partners in METU en ICL voor verder onderzoek, in WP2 en WP3. Verder werd een deel van de DUT-monsters gebruikt voor uni-axiale akoestische metingen onder hoge P,T voor het bepalen van de akoestische snelheid in de reservoirs en de deklaag. De resultaten zijn gedeeld met de partners die betrokken zijn bij geofysische beeldvorming en veldwerkactiviteiten. Daarnaast werden de uitkomsten gebruikt voor de eerste beeldvorming van het statisch model van het verticale snelheidsprofiel voor het bepalen van de bron- en ontvanger afstanden van het eerste seismische veldwerk.

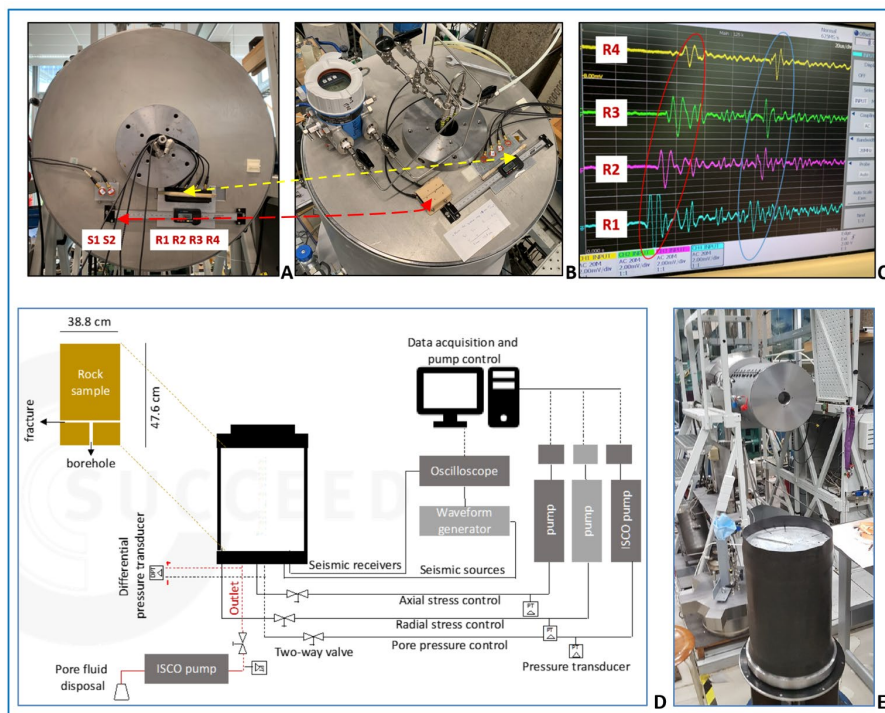


Figuur 2: Oppervlakte IJsland. Bemonstering van gesteenten voor lab-onderzoek. Hier zijn gesteenten verzameld van hyaloclastieten (A), intrusie (B) en een basalt (C)

In WP2 hebben SM en DUT, in interactie met de partners, voor beide locaties de geomorfologische situatie beoordeeld voor de keuzes die gemaakt moesten worden voor het uitzetten van de monitoringslijnen aan het oppervlak in Hellisheiði. Daarnaast is de eerste keuze gemaakt voor oppervlaktelijnen en monitoringputten in Kizildere. Wat de ontwikkeling van technische en operationele procedures betreft, werd besloten om de extra twee componenten geofoons (10 Hz) te implementeren en deze langs de glasvezellijnen te plaatsen. Om de kosten zo neutraal mogelijk te maken, hebben SM en DUT het vervoer voor zowel de eVibe, de monitoring-apparatuur en seismische lijnen samengevoegd en geïmplementeerd in de operationele procedures, monitoring lay-outs en infrastructuurplanning. Daarnaast zijn middels beeld kwantificatie de pre-, syn- en post-met CT-scans de volumeveranderingen van de ICL-geochemische experimenten uitgevoerd. Voorts bepaalden (DUT en ICL) de effecten van geïnjecteerd CO₂ op het reservoirgesteente bij Kizildere en Hellisheiði, en de mobiliteit van de geothermische vloeistof rond het boorgat en in het reservoir met betrekking tot de verbetering van de productieomstandigheden zoals druk en mobiliteit. Reservoir- en deklaaggesteenten zijn triaxiaal getest onder stress, poriedruk en hoge temperaturen en afwisselende met zout water en CO₂ verzadigd. Met kunstmatige breuken herkenden we veranderingen in seismische kenmerken en permeabiliteit. In de tussentijd, en parallel aan de kleinschalige experimenten (en met vele maanden van Covid-vertragingen), is de grootschalige HPHT-boorgatsimulator gereconstrueerd met behulp van aanwezige bestaande en gerenoveerde onderdelen, geleende randapparatuur voor data-acquisitie en extra behoefte aan techttime. Er zijn experimenten uitgevoerd met behulp van seismische respons in veranderend zowel basalt als marmar als reservoirgesteente, waarbij breuken verzadigd waren door het afwisselen van CO₂/zout water samenstellingen bij verschillende P,T en Sw/Sg. Seismische interferometrie is gebruikt om de vervanging van zout water door CO₂ te volgen. De resultaten van alle laboratoriumexperimenten worden gebruikt voor de constructie van verticale seismische profielen vanaf het oppervlak tot de reservoirdiepte, zowel in oorspronkelijke omstandigheden als na reservoirverzadiging. Daarnaast werden de uitkomsten gebruikt voor de eerste beeldvorming van het statische profiel voor het bepalen van de bron- en ontvanger-afstanden van het tweede seismische veldwerk.



Figuur 3: Kizildere, September 2019. Eerste besprekingen voor de selectie van monitoring- en injectieputten op de geothermische locatie van Zorlu in Kizildere.



Figuur 4: BOVEN. Configuratie van A) de transducers en bronnen van de ontvangers op 21 posities, B) Injectie- en productielijnen voor evacuatie en verzadiging met zout water en/of CO₂, C) Akoestische reflecties met resulterende vergelijkbare lagen met breuken voor droge, water verzadigde en CO₂-verzadigde porie-/breukruimte. ONDER. D) Schematische weergave van de experimentele opstelling, E) Configuratie van het monster in de rubberen hoes.

In WP3 heeft TU Delft bijgedragen aan de gesteentemechanica en geochemische gesteentekarakterisering door de voorbereiding en kwantificering van de geleverde kernen. Bovendien is via beeld kwantificatie de pre-, syn- en post-analyse van CT-scans uitgevoerd om de volumeveranderingen van de resultaten van de ICL-geochemische experimenten. Daarnaast bepaalden (DUT en ICL) de effecten van geïnjecteerd CO₂ op het reservoirgesteente bij Kizildere en Hellisheiði, en de mobiliteit van de geothermische vloeistof in het gebied rond het boorgat en het reservoir, en de verbetering van de productieomstandigheden zoals druk en mobiliteit.

Reservoir- en deklaaggesteenten zijn triaxiaal getest onder stress (Figuur 3). Poriedruk, temperatuur en, afwisselende zout water en CO₂-verzadigingen. Met kunstmatige breuken herkenden we veranderingen in seismische kenmerken en permeabiliteit. In de tussentijd, en parallel aan de kleinschalige experimenten (en met vele maanden van Covid-vertragingen), is de grootschalige HPHT-boorgatsimulator gereconstrueerd met bestaande en gerenoveerde onderdelen, geleende randapparatuur voor data-acquisitie en extra gebruik van techttime. Er zijn experimenten uitgevoerd met behulp van seismische respons in veranderende basalt en marmer reservoirgesteente als breuken verzadigd werden met afwisselend CO₂ en zout water en bij verschillende P,T en Sw/Sg. Seismische interferometrie is gebruikt om de vervanging van het zoute water door CO₂ te volgen. De resultaten van alle laboratoriumexperimenten worden gebruikt voor de constructie van verticale seismische profielen vanaf het oppervlak tot de reservoirdiepte, zowel in oorspronkelijke omstandigheden als na reservoirverzadiging. Daarnaast werden de uitkomsten gebruikt voor de eerste beeldvorming van het statische snelheidsprofiel voor het bepalen van de bron en ontvanger afstanden voor het tweede seismische veldwerk.

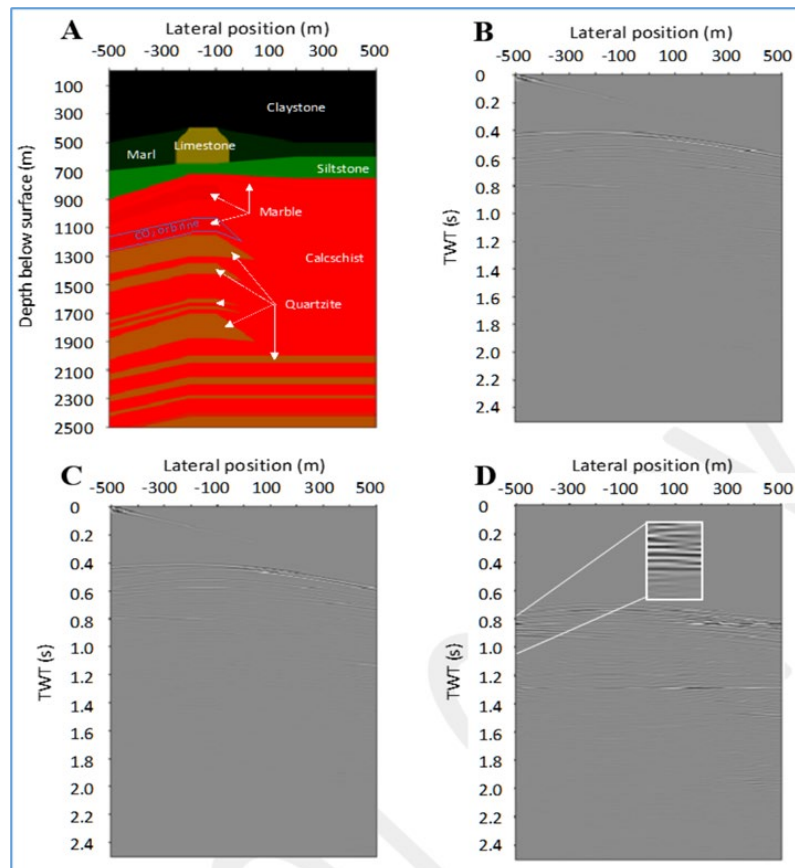
In **WP4** heeft SM eVibe gebouwd. Het apparaat is ontwikkeld, gebouwd en getest in de werkplaats en in het veld. Daarna werd het met succes gebruikt tijdens de twee veldcampagnes in IJsland en Turkije. Omdat het Silixa-iDAS-systeem ook innovatief was, werd besloten om referentiemetingen door de TU Delft toe te voegen aan alle basis veldwerkzaamheden, door bij alle monitoringactiviteiten gebruik te maken van de twee componenten geofoons. Als onderdeel van deze WP werden de seismische data-acquisitiecampagnes uitgevoerd. Tijdens de acquisitie in 2021, wanneer de eVibe niet werd gebruikt, verzamelden de stand-alone drie componenten geofoons (tijdelijk uitgeleend door het DEEPEN-project) permanent gegevens van passieve bronnen (d.w.z. seismische signalen van omgevingsgeluiden, zoals lokale, regionale en mondiale seismiciteit). Student Sverre Hassing gebruikte de passieve data voor zijn MSc-scriptie. Met behulp van seismische interferometrie creëerde hij een passief beeld van de ondergrond. Dit is vooral relevant voor de fiber optics kruislijn.



Figuur 5: Veld implementatie van de nieuwe 10kN eVibe in Kizildere op de geothermische plant.

Omdat de actieve bron zich alleen langs de basislijn heeft gewerkt, kon voor de kruislijn geen actief beeld van hoge kwaliteit worden verkregen. De TU probeerde deze leemte op te vullen met de constructie van een passie verkregen seismische beelden. In november 2022 werd de basislijn, d.w.z. vóór de CO₂-injectie, monitoring-acquisitie uitgevoerd in Kizildere, Turkije. De gegevens zijn verkregen met behulp van de nieuwe eVibe van SM als bron en de glasvezelkabel van Silixa als 'continue' ontvangers. Wederom zijn de conventionele geofoons van de TU Delft gebruikt om de met de glasvezelkabel verkregen resultaten te verifiëren. Het doel van deze monitoring-acquisitie is om een basislijn te hebben, die we later kunnen vergelijken met gegevens die zouden zijn verkregen wanneer aanzienlijke hoeveelheden CO₂ waren geïnjecteerd. De veldgegevens zijn verspreid onder alle partners die betrokken zijn bij geofysische monitoringactiviteiten. Hierdoor zijn, middels intensieve input van DUT en SM en in nauwe samenwerking met OR, ZORLU, ICL, OGS en Silixa, twee succesvolle seismische veldwerken voor de Hellisheiði en één voor Kizildere uitgevoerd (figuur 5). De data-acquisitie

resulteerde in een goede (micro-)seismische dataverwerking voor injectie-geïnduceerde seismiteit (Hellisheiði) en voortgang van CO₂-injectie in het reservoir. Voor Kizildere zijn alleen de basisactiviteiten gemonitord en verwerkt. ZORLU heeft de injectiefase (nog) niet uitgevoerd.



Figuur 7: A) Kizildere ondergronds model uit eerder werk (Janssen et al. 2021); basisconcept. B. Er werd speciale nadruk gelegd op de marmerlaag voor CO₂- en zout water snelheden uit de laboratoriummetingen (WP1, WP3). Enkelvoudige opnames voor het geval van een marmer reservoir verzadigd met CO₂ en (C) hetzelfde als (B) met zout water. (D) Verschil na subtractie van C van B. De amplitudes in het verschil en voor visualisatiedoeleinden met een factor 1.000 vergroot.

In WP5 en WP6 zijn de resultaten van WP1, WP2, WP3 en WP4, aangeleverd door DUT en SM, en gebruikt voor reservoirmodellering van alternatieve injectie- en reservoir scenario's met daar aan gerelateerde efficiëntie. DUT en OGS hebben voor Kizildere een ondergronds model opgesteld waarvoor het snelheidsmodel is overgenomen uit ons eerdere werk (Janssen et al. 2021). Er is als reservoir de 3^e marmerformatie (weergegeven door de blauwe omtrek in figuur 7, waarvoor CO₂- en zout water snelheden uit de lab metingen zijn worden gebruikt voort geofysische visualisatie van de CO₂-verspreiding. Daarna zijn alle resultaten toegepast voor een techno-economische beoordeling en optimalisatie van het veld en voor de Kizildere-regio m.b.t. regionale CO₂ injectie-strategieën.

In WP7 hebben DUT en SM bijgedragen aan informatie bijeenkomsten over de betrokkenheid van belanghebbenden in Denizli en Ankara (Turkije) middels workshops (figuur 8) en in Den Haag (Nederland), via het Nederlandse CATO II programma. Daarnaast is informatie verspreid middels publieke communicatie zoals de nieuwsbrieven van TU- Delft en kranten. Bovendien zijn diverse conferenties en overzichtspublicaties gegenereerd met betrekking tot de CO₂-injectie/opslag geïntegreerd met geothermische technologie. In samenwerking met de partners werd een blauwdruk ontwikkeld en toegepast voor de validatie van monitoring-, modellerings- en verificatiemethodologieën die toepasbaar zijn op andere geothermische systemen met hoge enthalpie.

In **WP8** was TU Delft verantwoordelijk voor de projectplanning, monitoring en uitvoering, in nauwe samenwerking met ICL, en nam zij deel aan het projectmanagement door de voorbereiding van periodieke projectvergaderingen, notulen en periodieke rapporten. Er werden periodieke rapporten opgesteld, via ICL voor ERA-ACT, over het monitoren van de tijdsplanning, de voortgang en het volgen van deliverables, mijlpalen en verspreidingsactiviteiten via het SUCCEED-monitoringinstrument. Afwijkingen van de werkbeschrijving en uitgevoerde herstelprocessen m.b.t. de Covid vertraging zijn toegelicht. Door DUT en SM zijn vergelijkbare activiteiten gerapporteerd voor RVO. Deze zijn specifiek samengesteld voor het Nederlandse deel van de activiteiten dat door RVO wordt ondersteund. TU Delft werkte mee aan de organisatie van management en technisch inhoudelijke evenementen, veelal via TEAMS- of ZOOM-sessies met werkpakketleiders. Daarnaast was er overleg m.b.t. de technische voortgang in het laboratorium, voor veldwerk, voor interpretatie, modellering en scenariobouw. en in het bijzonder de ontwikkeling, constructie, kalibratie en implementatie van de eVibe door SM. Daarnaast is de Nederlandse verspreiding van resultaten via websites, interviews, (conferentie) presentaties, stakeholderbijeenkomsten en beoordeelde publicaties gemonitord en verwerkt via de procedures van het SUCCEED-programma.



Figuur 8. Stakeholdersbijeenkomst en workshop op de geothermische plant in Kizildere, Turkije, november 2022.

Outputactiviteiten gerelateerd aan DUT en SM.

Vakliteratuur

- Janssen M.T.G., Barnhoorn A., Draganov D., Wolf K-H.A.A., Durucan S. 2021. Seismic Velocity Characterisation of Geothermal Reservoir Rocks for CO₂ Storage Performance Assessment. *Applied Sciences*. 11(8), 3641. <https://doi.org/10.3390/app11083641>. Article is Open Access: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/8/3641>.
- Parlaktuna, M., Durucan, Ş., Parlaktuna, B., Sinayug, Ç., Janssen, M.T.G., Şenturk, E., Tongic, E., Demircioglu, Ö., Poletto, F., Bohm, G. and Bellezza, C., 2021. Seismic velocity characterisation and survey design to assess CO₂ injection performance at Kizildere geothermal field. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 30(9), pp.1061-1075.

- Janssen, M.T.G, Barnhoorn, A., Draganov, D., Wolf, K. H. A., & Durucan, S. (2021). Seismic Velocity Characterisation of Geothermal Reservoir Rocks for CO₂ Storage Performance Assessment. *Applied Sciences*, 11(8), 3641.
- Janssen, M.T.G., Draganov, D., Barnhoorn, A. and Wolf, K.H.A.A., 2023. Storing CO₂ in Geothermal Reservoir Rocks from the Kizildere Field, Turkey: Combined Stress, Temperature, and Pore Fluid Dependence of Seismic Properties. *Geothermics*, 108, p. 102615.
- Sverre H.W. Hassing, Deyan Draganov, Martijn Janssen, Auke Barnhoorn, Karl-Heinz A. A. Wolf, Jens van den Berg, Marc Friebel, Gijs van Otten, Flavio Poletto, Cinzia Bellezza, Erika Barison, Baldur Brynjarsson, Vala Hjörleifsdóttir, Anne Obermann, Pilar Sánchez-Pastor, Sevket Durucan. 2023. Imaging CO₂ reinjection into basalts at the CarbFix2 reinjection reservoir (Hellisheiði, Iceland) with body-wave seismic interferometry. In *Geophysical Prospecting*, Manuscript GP-2023-4339. DOI: 10.1111/1365-2478.13472 Open article.

Conference meetings and Presentaties

- Karl-Heinz Wolf: SUCCEED - Synergetic Utilisation of CO₂ storage Coupled with geothermal EnErgy Deployment. CATO-3 meeting, ACT - RVO presentations to the CATO-3 Consortium. 26 November 2019, Utrecht, the Netherlands
- Durucan S., Korre A., Parlaktuna M., Şenti. irk E., Wolf K-H.AA, Chalari A, Stork AL., Nikolov S., de Kunder R., Sigfusson B., Hjørleifsdóttir V., Andersen N., Poletto F., 2021. SUCCEED: A CO₂ storage and utilization project aimed at mitigating against greenhouse gas emissions from geothermal power production. Proc. 15th Int. Conf. Greenhouse Gas Control Technologies, 15-18 March, Abu Dhabi, UAE, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3819789>.
- Janssen, M., Russel, J., Barnhoorn, A., Draganov, D., Wolf, K., & Durucan, S. (2020, November). Seismic Velocity Characterization and Modelling for Synergetic Utilisation of CO₂ Storage Coupled with Geothermal Energy Extraction. In *1st Geoscience & Engineering in Energy Transition Conference* (Vol. 2020, No. 1, pp. 1-6). European Association of Geoscientists & Engineers. The Extended abstract can be found online: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.202021053>.
- Janssen, M.T.G., Draganov, D., Bos, J., Farina, B., Barnhoorn, A., Poletto, F., Van Otten, G., Wolf, K. and Durucan, S., 2022a, June. Monitoring CO₂ Injection into Basaltic Reservoir Formations at the Hellisheiði Geothermal Site in Iceland: Laboratory Experiments. In 83rd EAGE Annual Conference & Exhibition (Vol. 2022, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Janssen, M.T.G., Barnhoorn, A., Draganov, D., and Wolf, K.H.A.A., 2022b. CO₂ Storage in Geothermal Reservoir Rocks: A Seismic Velocity Characterization Study. In *European Geothermal Congress 2022*, Berlin, 17-21 October 2022.
- Janssen, M.T.G., Garcia, E.R., Barnhoorn, A., Draganov, D., and Wolf, K.H., 2022. Storing CO₂ in Geothermal Reservoir Rocks: A Laboratory Study on Acoustic and Mechanical Properties (No. EGU22-4396). Copernicus Meetings. Presentations on baseline seismic response characterization study on Icelandic formations.
- Stork, A.L., Poletto, F., Draganov, D., Janssen, M.T.G. et al. Monitoring CO₂ Injection with Passive and Active Seismic Surveys: Case Study from the Hellisheiði Geothermal Field, Iceland. In 16th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies.
- Hassing, S., Draganov, D., Barnhoorn, A. and Janssen, M., 2022, November. Imaging the CarbFix2 Reinjection Reservoir at Hellisheiði, Iceland, with Body-Wave Seismic Interferometry. In *Second EAGE Conference on Near Surface in Latin America* (Vol. 2022, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Athena Chalari, Anna L. Stork, Mike Spence, David Boon, Alison Monaghan, Flavio Poletto, Walter Boehm, Erdiç Şentürk, Mahmut Kaan Tüzen, Richard de Kunder, Ismael Vera Rodriguez, Joseph Wolpert. Jens van den Berg, Deyan Draganov. 2024. Distributed Fiber Optic Sensing for Geothermal Applications. 3rd EAGE Geotech., 2024.

- Athena Chalari, Anna L. Stork, Flavio Poletto, Fabio Meneghini, Cinzia Bellezza, Biancamaria Farina, Ari David, Gualtiero Böhm, Andrea Schleifer, Sevet Durucan, Baldur Brynjarsson, Gijs van Otten, Deyan Draganov, Vala Hjörleifsdóttir, Auke Barnhoorn, Karl-Heinz Wolf, Anna Korre, Anne Obermann, Pilar Sánchez-Pastor, Erdiñ Şentürk, Mahmut Parlaktuna. Monitoring CO₂ injection with Distributed Acoustic Sensing (DAS) passive and active seismic surveys.

Thesis werk

- Sverre Hassing, 2023. Body-wave seismic interferometry on passive seismic data for imaging CO₂ reinjection at the Hellisheiði geothermal power plant, Iceland. MSc-thesis.
<http://resolver.tudelft.nl/uuid:f1baaf83-74c2-4438-8090-1dc01305c918>
- Elara Redondo Garcia, 2023. Petrophysical and Mechanical Characterization of the Volcanic Rocks in the Hellisheiði Geothermal Field and implications of Thermal Fracturing in CO₂ mineralization. MSc-thesis.
<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A641e5df2-c411-450d-9095-342673a225a7>

De knelpunten en oplossingen

De knelpunten in het programma zijn direct gerelateerd aan de Covid vertragingen.

De problemen:

Het project liep ernstige vertraging op vanwege de lockdowns. Veel acties zijn daarom uitgesteld en in een later stadium uitgevoerd. Daardoor raakte de chronologische volgorde van de acties in de werkpakketten soms gefragmenteerd, wat resulteerde in een verschuiving in de tijd om alle programma's te voltooien. Voor DUT en SM hebben de lockdowns de volgende grote problemen veroorzaakt:

1. Een reisverbod: In het voorjaar van 2020 en de winter van 2020/2021 stonden de overheid en de Universiteit Delft geen reisactiviteiten naar IJsland en Turkije toe. In totaal resulteerde dit in negen maanden beperkingen in de veldwerkmogelijkheden. Bovendien was het veldwerk in IJsland pas mogelijk nadat de wintersneeuw voorbij was.
2. Een ernstige vertraging of geen aankomst van materialen voor het bouwen van apparatuur en het uitvoeren van laboratoriumtaken. Voor de TU Delft betekende dit dat de Borehole Simulator in eerste instantie niet kon worden omgebouwd voor de hoge P,T-experimenten op grote kernen van IJsland en Turkije. Het duurde bijna een jaar voordat alternatieve opties klaar waren voor gebruik. Voor SM werden onderdelen voor de nieuwe eVibe niet of maanden later geleverd dan verwacht. Bovendien voldeden alternatieven soms niet aan de normen zoals gevraagd voor langdurig herhaald gebruik van de nieuwe machine.
3. Daarnaast zijn er kleine problemen aan de orde gesteld, zoals de verspreiding van resultaten op conferenties en presentaties voor de industrie, onderzoeksinstituten, overheidsinstanties en bijeenkomsten met partners.
4. Tijdens de eerste Covid lock-down werd duidelijk dat met het gebruik van nieuw ontwikkelde en gebouwde apparatuur en materialen de kleinschalige referentietests meer resultaten zouden moeten opleveren voor de vergelijking van data-acquisitie, -verwerking en -beeldvorming. Deze extra taak moest binnen het programma worden uitgevoerd zonder de bestaande taken te belemmeren.

De oplossingen:

De oplossing voor deze problemen is gevonden in uitbreiding van het programma door verlenging van de tijdlijnen en verschuiving van budgetten. Voor de Covid-vertraging en het tweede veldwerk in Turkije kregen we van RVO toestemming voor een eerste verlenging tot februari 2023. Daarna veroorzaakten problemen met de deliverables van ZORLU, d.w.z. de aankoop en injectie van CO₂, een tweede verlenging voor het verwerven van

extra financiering. RVO keurde een verlenging tot februari 2024 goed, maar in november 2023 mislukte deze poging en werd besloten het project stop te zetten. Uiteindelijk zijn, met uitzondering van het laatste veldwerk, alle WP-taken met betrekking tot DUT en SM uitgesteld maar afgerond. De brieven voor verlenging, goedkeuring van verlenging, budgetverschuivingen en zijn samengevat in bijlage 1.

Er is geprobeerd om binnen de manmaanden te blijven zoals aangegeven of via een verschuiving van budgetten voor manuren en andere kostenposten. Alle financiering die voor dit programma nodig waren zijn overgenomen door SM en DUT. Dit betreft voor alle uitgaven boven de Lumpsum van het RVO contract.

Perspectief voor toepassing

De ontwikkeling en implementatie van de eVibe.

Het veldwerk en lab programma leverde de meeste parameters op om een nieuw type eVibe door SM te construeren, ofwel:

- De nieuwe seismische vibrator heeft een elektrische lineaire synchrone motor (LSM) en kan worden beschouwd als een veelbelovend resultaat voor duurzame geothermische exploratie in stedelijke regio's en beschermde natuurgebieden in Europa en de wereld. Het heeft een zeer kleine en schone voetafdruk. Minimale of geen emissie, hogere kwaliteit en trillingen met een lagere amplitude, beperkt geluid en daardoor minimale of geen beperkingen maken het bijna overal gemakkelijk te gebruiken.
- In tegenstelling tot hydraulische vibrators behoudt de eVibe consistente prestaties over het gehele frequentiespectrum, waardoor signaalvervalsing wordt verminderd, vooral bij lagere frequenties. Deze vooruitgang heeft geleid tot seismische beeldvorming met hoge resolutie.
- De signaal herhaalbaarheid van het eVibe-systeem overtreft die van hydraulische systemen, wat resulteert in superieure beeldvorming in zowel ondiepe als diepe oppervlakken. Het geeft een aanzienlijke verbetering in de analyse van oppervlaktegolven, ondanks dat hydraulische vibrators vijf tot vijftien keer meer kracht uitoefenen. Bijgevolg heeft dit geleid tot verbeterde boor- en productieresultaten.

Het laboratoriumwerk en veldactiviteiten voor geofysische beeldvorming en modellering:

- De petrografische, petrofysische en geofysische experimenten in het laboratorium zijn uitgevoerd op verschillende schaalniveaus en onder verschillende temperaturen, stress, poriedruk en met zowel zout water als CO₂. In samenwerking met ICL (geochemie) en METU (gesteentemechanica) werd een database gecreëerd voor zowel een vulkanische als een intrusieve geologische omgeving bruikbaar voor de voorspelling van interacties van gesteentevloeistof en de daarmee samenhangende geofysische responsveranderingen. Bovendien heeft het datasets opgeleverd die bruikbaar zijn om specifiek voor dit soort gebieden akoestische snelheidsmodellen te maken.
- De akoestische weergaven werden gebruikt om de veldindeling voor monitoringsystemen te bepalen, d.w.z. de iDAS glasvezeloppervlaktelijnen en in putten, de stand-alone driecomponenten SmartSOLO-geofoons en -station en de conventionele opname door tweecomponenten bekabelde geofoons (10Hz); dat is nieuw. Vervolgens zijn de drie resultaten met elkaar vergeleken om de kwaliteit en robuustheid van de continue passieve seismische resultaten van het iDas-systeem te verifiëren. De rapportage van S. Hassing (2023) vormt de basis voor deze werkwijze om time lapse imaging uit te voeren tijdens een injectieperiode.
- De resulterende beelden voor Hellisheidi en Kizildere vormden de basis voor de reservoirmodelconfiguraties van de reservoirs en de deklaag. Resultaten over stress- en temperatuur gerelateerde interacties tussen rotsen en vloeistoffen en de daarmee samenhangende petrofysische en petrologische resultaten vormden de basis voor scenariomodellering en voorspellingen van de impact op de life-time cyclus van reservoirs.

Commerciële spin-off.

Als spin-off blijkt de SUCCEED-werkwijze effectief en gereed voor verspreiding via publicaties en presentaties naar bedrijven m.b.t. implementatie in toekomstige CO₂ bergingsprojecten of cyclische exploitatie van de ondergrond.

□ Beschrijving van de bijdrage van het project aan de doelstellingen van de regeling (duurzame energiehuishouding, versterking van de kennispositie)

De bijdrage van dit werk aan de doelstellingen van deze regeling zijn gebaseerd op de samenwerking tussen nationale en internationale bedrijven en kennisinstellingen, die hebben geleid tot het gebruik van nieuw ontwikkelde milieuvriendelijke methoden en technieken om CO₂ opslag en CO₂ verbeterde productie te demonstreren.

- De ontwikkeling, bouw en gebruik van de eVibe als een schone elektrische seismische bron, voor kortstondig en langdurig gebruik. De kwaliteit van de bron geeft goede, nauwkeurig repeterende signalen die een hogere resolutie creëert van de ondergrond tot ca 2km diepte.
- Gekoppeld aan de nieuw ontwikkelde fiber-optic kabels en integrator, het iDAS systeem van Silixa, kan langdurig continu worden monitoring plaatsvinden zonder beschadiging van natuur en infrastructuur.
- De combinatie van de resultaten uit het internationale lab werk is direct implementeerbaar in nieuw ontwikkelde structuurmodellen, reservoirmodellen en levenscyclus milieu impact beoordelingen. Daarnaast zijn de resultaten uit voorgaande modelresultaten gebruikt in techno-economische beoordeling met optimalisatie voor de gehele infrastructuur.

Ofwel, voor de duurzaam gerelateerde activiteiten zijn er nu specifiek voor opslag, verbetering van geothermische systemen en monitoring methoden en technieken om deels of integraal nieuwe verduurzamingsprogramma's uit te voeren. Deze zijn beschikbaar voor zowel bedrijfsleven, kennisinstututen als overheden.

□ Spin-off binnen en buiten de sector

Als spin-off is de eVibe nuttig voor duurzame projectontwikkeling en monitoring:

- De motor wordt gevoed met opgewekte elektriciteit, bijvoorbeeld een CO₂-uitstotende generator. Nu, met de constructie van een krachtige accu, is het mogelijk om zonder een brongenerator een volledige werkdag het systeem te laten draaien. 's Nachts wordt de batterij opgeladen, waardoor de energie-efficiëntie tijdens het gehele veldwerk toeneemt.
- Overdracht: De eVibe is door kleine transporteurs gemakkelijk te verplaatsen door woongebieden en ruige landschappen, en in het hele seizoen en in extreme klimaatomstandigheden. De schade aan de infrastructuur en aan natuurlijke habitatten is dus minimaal.
- Positie: Vanwege het vermogen om continu herhaalbare en constante signalen af te geven, kan de eVibe als seismische bron worden gebruikt voor het voortdurend monitoren van in-situ processen, zoals de verspreiding van CO₂ bij opslagprojecten; CO₂-EOR/EGR-activiteiten; Geothermische enthalpieproductie en retourwaterinjectie; Cyclische H₂-opslag; Ondergrondse bewegingen als gevolg van vulkanische activiteiten; en andere initiatieven waarbij menselijke interactie met de in-situ geologische structuren een tijdsafhankelijke petrofysische veranderingen veroorzaakt.
- Het economische voordeel. Nu, na dit resultaat, is de ontwikkeling en bouw van eVibes financieel zeer aantrekkelijk, omdat de exploitatiekosten veel lager zijn dan die van conventionele methoden. De kwaliteit van de gegenereerde signalen en de resulterende data-acquisitie bewijst dat een risicovermindering van de datakwaliteit en verbeterde herhaalbaarheid superieure beeldvorming en betere beoordelingsresultaten

oplevert voor verbeterde boor- en productiebeoordelingen. De kosten zijn aanzienlijk lager dan die van conventionele systemen.

Commerciële spin-off van de eVibe.

Voor SM heeft dit project geholpen bij het lanceren van monitoring- en beeldvormingsactiviteiten in de volgende acht projecten in verschillende landen:

- Duurzame projecten: 1. Geothermie Eindhoven; 2. Geothermie Breda; 3. Geothermie Amsterdam; 4. Geothermie Lelystad.
- Milieu- en onderzoeksprojecten: 5. CCUS, North Dakota; 6. De Einstein Telescoop 2D (potentieel 3D); 7. TNO VSP.
- Conventionele exploratieprojecten: 8. Olie en gas in Noord-Australië.

Spin-off van het laboratoriumwerk en veldactiviteiten voor geofysische beeldvorming en modellering:

Als spin-off blijkt de SUCCEED-werkwijze effectief en gereed voor verspreiding via publicaties en presentaties naar bedrijven m.b.t. implementatie in toekomstige CO₂ bergingsprojecten of cyclische exploitatie van de ondergrond.

- Zoals figuur 1 laat zien, tonen de integratie van alle werkpakketten binnen SUCCEED, met een verbeterde aanpak met nieuwe apparatuur en methoden voor gegevensverzameling, een tijd gerelateerd continu geofysische monitoring met geologische beeldvorming en met hogere resolutie voor de configuratie van geologische reservoirs. Door gebruik te maken van relevante laboratorium-input, voorspelling van de ondergrondse processen en daarmee gedefinieerde in-situ veranderingen, geeft dit een beter permanent toezicht op de operatie en bij de nazorg.
- De milieuvriendelijke aanpak biedt handvatten voor een betere beoordeling van de voorspelling van een efficiënte levenscyclus tijdens en na de gehele operatie.
- Het gecombineerde pakket van nieuw ontwikkelde apparatuur en monitoringtools biedt minder tijdrovende procedures voor het uitvoeren van beoordelings-, productie- en terugwinningsactiviteiten. De kosten kunnen dus aanzienlijk dalen gedurende de gehele levenscyclus van de exploitatie.
-

□ **Overzicht van openbare publicaties over het project en waar deze te vinden zijn.**

Allereerst zijn alle door TU-Delft en Seismic Mechatronics behaalde resultaten terug te vinden in de eerder weergegeven literatuurlijst. Voor nadere details kunnen geïnteresseerden contact opnemen met de auteurs van dit rapport.

- Voor publieke en technisch-wetenschappelijke interesse maakt TU Delft gebruik van de internationale SUCCEED website: <https://www.imperial.ac.uk/energy-futures-lab/succeed/>.
- Voor Nederland maakt de TU Delft gebruik van de Delft Project Site, Delft-PURE en CATO-II. <https://www.tudelft.nl/citg/over-faculteit/afdelingen/geoscience-engineering/research/geothermal/geothermal-science-and-engineering/research/succeed>
- Specifiek voor de eVibe-activiteiten biedt de website van Seismic Mechatronics alle benodigde informatie: <https://seismic-mechatronics.com/>
- Voor scholieren en andere belangstellende zijn er TU-Delft sites met informatie en videos die introducties geven:
 - A. Dutch: <https://www.tudelft.nl/delft-integraal/articles/bruiswater-voor-meer-stroom>
 - B. English: <https://www.tudelft.nl/en/delft-outlook/articles/carbonated-water-for-steam-and-power>

- A. Dutch: <https://www.tudelft.nl/citg/onderwijs/student-stories/co2-problemen-oplossen-met-vulkanische-stenen>
- B. English: <https://www.tudelft.nl/en/ceg/education/student-stories/volcanic-rocks-solving-co2-problems>

- Voor interactie met belanghebbenden zal de TU Delft mogelijkheden bieden om de laboratorium- en veld- en apparatuur te tonen en uit te leggen .
- Technische en milieubeurzen en conferenties worden bijgewoond via stand-demonstraties, workshops en presentaties. Hier zijn IPPC, COP, EAGE, EGU, SGE, SPE belangrijke opties, zowel voor. Bovendien zijn CO2GeoNet Open Forum-evenementen zeer relevant voor de continuïteit van de commercieel gerelateerde activiteiten op het gebied van CO2-opslag.
- Voor SM en DUT moeten de presentaties van het milieuduurzaamheidsprofiel voor schone seismiek in stedelijke gebieden worden getoond via korte mededelingen aan de industrie via zakelijke communicatiekanalen, regionale milieu-overheidsinstanties en professionele geo-wetenschappelijke en technische organisaties.

□ Vermelding waar en tegen welke prijs meer exemplaren van dit rapport te bestellen zijn.

- Alle openbare rapportages zijn gratis te downloaden van bovengenoemde websites. “Delft.Pure” heeft daarnaast ook een ruime sortering beschikbaar.
- De open publicaties zijn gratis te downloaden bij de uitgevers genoemd in de bovengenoemde literatuurlijst.
- De beschermde publicaties zijn (helaas) door betaling opvraagbaar bij de uitgevers genoemd in de bovengenoemde literatuurlijst. Ook kan u contact opnemen met onderstaande betrokkenen.
- Voor vragen kunt u zich melden:
 - Voor het SUCCEED project in het algemeen via dr. K-H. Wolf: k.h.a.a.wolf@tudelft.nl
 - Voor het experimentele laboratoriumwerk via dr. A Barnhoorn: auke.barnhoorn@tudelft.nl
 - Voor de geofysische experimenten en veldwerk via dr. D. Draganov: d.s.draganov@tudelft.nl
 - Voor interesse in de eVibe bij Seismic Mechatronics via: <https://seismic-mechatronics.com/contact/>

□ Contactpersonen voor meer informatie..

Voor vragen kunt u zich melden bij de volgende contactpersonen:

- Voor het SUCCEED-project in het algemeen via dr. K-H. Wolf: k.h.a.a.wolf@tudelft.nl
- Voor het experimentele laboratoriumwerk via dr. A Barnhoorn: auke.barnhoorn@tudelft.nl
- Voor de geofysische experimenten en veldwerk via dr. D. Draganov: d.s.draganov@tudelft.nl
- Voor interesse in de eVibe bij Seismic Mechatronics via: <https://seismic-mechatronics.com/contact/>

Dankbetuigingen

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

Dankbetuigingen II

SUCCEED wordt gefinancierd via het ACT-programma (Accelerating CCS Technologies, Horizon 2020 Project nr. 294766). Financiële bijdragen van het Department for Business, Energy & Industrial Strategy UK (BEIS), de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO), de Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) en onze onderzoekspartners Orkuveita Reykjavíkur/Reykjavík Energy IJsland (OR) en Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale Italy (OGS) worden dankbaar erkend.